

NN31545.1834

ICW nota 1834
februari 1988



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

DE INVLOED VAN VERSCHILLENDE BODEMPARAMETERS OP DE
INDRINGINGSWEERSTAND VAN ZANDGROND

N.M.M. de Wit



Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

28 MAART 1988

I N H O U D

	Blz.
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
1.1. Algemeen	1
1.2. Doel en opzet van de proevenserie	2
2. LITERATUURONDERZOEK	3
2.1. De penetrometer	3
2.2. Instrumentfactoren	4
2.3. Theorieën	12
2.3.1. Berekening van het puntdraagvermogen of conusweerstand	12
2.3.2. Spanningsverdeling en stromingsgedrag	17
2.3.3. De invloedssfeer van de sondering	21
2.4. Beworteling en bewortelbaarheid	23
2.5. Relaties indringingsweerstand, volumieke massa, vochtgehalten, vochtspanning	26
2.6. Relatie vochtgehalte - vochtspanning	29
2.7. Formules	31
3. BESCHRIJVING VAN DE GEBRUIKTE PENETROMETER	34
4. UITVOERING VAN DE PROEVENSERIE	36
4.1. Manier van vullen van de modelproefbak	36
4.2. Uitvoering van het veldonderzoek	38

	Blz.
5. RESULTATEN EN ANALYSE	39
5.1. Proevenserie modelproefbak	39
5.1.1. Invloed van de wand	40
5.1.2. Meetresultaten	41
5.1.3. Vergelijking conussen	42
5.1.4. Relatie indringingsweerstand - dichtheid	44
5.1.5. Relatie indringingsweerstand - vochtgehalte / vochtspanning	45
5.1.6. Relatie indringingsweerstand - schijnbare cohesie	48
5.2. Proevenserie Westerhoven	49
5.2.1. Meetresultaten	50
5.2.2. Relatie indringingsweerstand - dichtheid	51
5.2.3. Relatie indringingsweerstand - vochtgehalte / vochtspanning / schijnbare cohesie	53
5.3. Vergelijking proefbakonderzoek - veldonderzoek	56
5.4. Bruikbaarheid formules	58
6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	61
6.1. Conclusies	61
6.2. Aanbevelingen voor verder onderzoek	62
SAMENVATTING	64
LITERATUUR	66
BIJLAGEN	

VOORWOORD

Deze nota is het verslag van een 5-maands afstudeervak Cultuurtechniek, dat is uitgevoerd in de periode april tot september 1987 in het kader van mijn studie aan de Landbouw Universiteit Wageningen. Het onderzoek is uitgevoerd bij het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) te Wageningen.

Het onderzoek met de penetrometer naar de invloed van de verschillende bodemparameters op de indringingsweerstand maakt onderdeel uit van het project "bodemverdichting". In het kader van dit project heb ik meegeholpen om met behulp van de penetrometer de bodemverdichting aan te tonen en te kwantificeren.

Graag maak ik van de gelegenheid gebruik om ir. Jan van den Akker, voor de begeleiding vanuit het ICW, en ir. L. Eppink voor de begeleiding vanuit de vakgroep Cultuurtechniek, te bedanken. Verder wil ik alle mensen die verder bijgedragen hebben aan de totstandkoming van dit onderzoek van harte bedanken.

Wageningen, november 1987

1. INLEIDING

1.1. Algemeen

Bij de huidige mechanisatie wordt bij het berijden van de grond de ondergrond zwaar belast. Dit heeft tot gevolg dat hier verdichting optreedt, waarbij deze verdichting zo sterk kan zijn dat de ondergrond niet meer bewortelbaar is. Dit kan het gevolg zijn van het feit dat het porienvolume te klein wordt, wat aeratieproblemen kan geven, of dat de indringingsweerstand te hoog wordt voor de wortels. De verdichting komt voornamelijk voor op humusarme zandgronden en daarom zal bij de verdere proeven gebruik gemaakt worden van een zeer fijne sterk leemhoudende zandgrond, zoals die wordt aangetroffen in Noord-Brabant bij de plaats Westerhoven op een proefveld van het Proefstation voor de Akkerbouw en Groenteteelt in de Vollegrond (PAGV). Voor dit zand is gekozen, omdat daar in het verleden door het PAGV in samenwerking met het ICW berijdingsproeven zijn uitgevoerd. Om deze reden zijn met dit zand in het laboratorium allerlei proeven, zoals triaxiaalproeven en het vaststellen van de pF-curve, uitgevoerd. Bovendien zijn de korrelverdelingen op verschillende diepten van deze grond bepaald.

Om de verdichting te kunnen meten is het nodig om ongestoorde ringmonsters te steken, waarbij een gat gegraven moet worden, hetgeen veel tijd kost en het bodemprofiel verstoort. Een andere veelgebruikte methode om de mate van verdichting te bepalen is het meten van de indringingsweerstand. Het voordeel van deze methode is dat op een snelle wijze veel metingen kunnen worden verricht. Dit is zeker tegenwoordig het geval, waarbij de metingen veelal naar een draagbare personal computer worden weggeschreven en de gegevens eventueel later op kantoor met een grotere computer kunnen worden verwerkt. Op deze wijze kan inzicht worden verkregen over de verdeling van de verdichting over een veld. Het nadeel van het meten van indringingsweerstand is dat deze afhankelijk zijn van vele parameters, zoals grondsoort, dichtheid, vochtgehalte en vochtspanning.

Het onderzoek wordt gesplitst in een uitgebreid literatuuronderzoek en een proevenserie.

1.2. Doel en opzet van de proevenserie

Het hoofddoel van de proevenserie is om meer duidelijkheid in de afhankelijkheid van de indringingsweerstand van de verschillende bodemparameters te brengen. Ideaal zou zijn als dit zou resulteren in een grafiek waarin de indringingsweerstand tegen de volumieke massa of de dichtheid wordt uitgezet, rekening houdend met de vochtspanning of het vochtgehalte.

Een ander doel is het bepalen van het verschil tussen metingen met verschillende typen conussen. Deze conussen zijn de in Nederland gangbare conus met een tophoek van 60° en een oppervlak van 1.0 cm^2 en de internationaal meer gebruikte ASAE(B)-conus met een tophoek van 30° en een oppervlak van 1.3 cm^2 (0.2 inch^2).

De proevenserie is gesplitst in twee delen, namelijk een gedeelte in de proefbak op het ICW en een gedeelte in het veld. De proefbak wordt met zand, dat op het PAGV-proefveld in Westerhoven is afgegraven, gevuld. Dit gebeurt door een afgewogen hoeveelheid grond in een bepaald volume te doen en dit met een stamper samen te drukken. De uiteindelijke dichtheid is dus van te voren berekend. Voordat de grond in de proefbak gedaan wordt is deze op een vastgesteld vochtgehalte gebracht. Nadat de proefbak gevuld is, worden er tensiometers in aan- gebracht om de vochtspanningen te meten. De wijze van invullen van de proefbak heeft tot gevolg dat, door de uniforme dichtheid en vochtgehalte, de standaardafwijking tussen de verschillende penetrometerwaarnemingen relatief klein zal zijn. Na de sonderingen wordt met behulp van ringmonsters de precieze dichtheid bepaald. Deze procedure is met drie verschillende vochtgehaltes en twee verschillende dichtheden uitgevoerd. De gekozen vochtgehaltes komen in de veldsituatie regelmatig voor.

In het veld is dezelfde procedure gevolgd als in de proefbak. In het begin van het groeiseizoen zijn tensiometers geplaatst, die tijdens het groeiseizoen zijn afgelezen. Verder zijn ook vocht- en ringmonsters genomen en sonderingen uitgevoerd. De dichtheden zijn in het horizontale vlak redelijk uniform, zodat er slechts op enkele plaatsen ringmonsters moeten worden genomen. De gegevens verkregen uit de proefbak en die uit het veld worden vergeleken, en bekeken zal worden of de situatie in de proefbak representatief is voor die in het veld.

2. LITERATUURONDERZOEK

2.1. De penetrometer

De penetrometer is een instrument waarbij de kracht of energie gemeten wordt, die nodig is om een staaf met daarop een conus de grond in te drukken. Er is op vier manieren onderscheid tussen de verschillende typen penetrometers te maken:

- 1) Continuïteit van de meting.
- 2) Soort aflezing.
- 3) Continuïteit van de registratie.
- 4) Manier van registratie.

Ad 1) De conus kan of continue, dat wil zeggen in een doorgaande beweging met een constante snelheid in het totale te bemonsteren traject gedrukt worden, of discontinue, waarbij het totale traject in gedeelten bemonsterd wordt.

Ad 2) Er zijn twee soorten van aflezen, namelijk:

- Statisch sonderen. Bij dit type meting wordt de benodigde kracht afgelezen. Dit kan zowel continue als discontinue gebeuren.
- Dynamisch sonderen. Bij dit type meting is niet de kracht, maar de verplaatsing een maat voor het draagvermogen of de indringingsweerstand (Iw). De apparaten waarmee dit type metingen worden uitgevoerd zijn uitgerust met een voorziening om steeds eenzelfde energiestoot, meestal met een valgewicht, te geven, waarna de verplaatsing onder invloed van deze energiestoot als maat voor het draagvermogen wordt genoteerd. Deze metingen zijn altijd discontinue.

Ad 3) De registratie van de gegevens kan continue plaatsvinden of discontinue, dat wil zeggen op bepaalde diepten een meting.

Ad 4) De penetrometer kan zelfregistrerend zijn, door de conuswaarde continue tijdens de meting te verzamelen in een lijn, zoals bij de penetrograaf, of door de gegevens in digitale vorm in een

portable computer op te slaan, zoals de Bush-penetrometer doet. Indien de penetrometer niet zelfregistrerend is moeten de meetwaarden tijdens het sonderen door een tweede persoon worden opgeschreven.

De manier waarop de benodigde kracht wordt gemeten, berust op een aantal verschillende principes:

- Het veerprincipe. Bij het veerprincipe wordt de Iw geregistreerd door middel van de indrukking die een veer of een stel veren ondergaat, wanneer een door een bepaald mechanisme met deze veren verbonden conusstang met een constante snelheid de grond in wordt gedrukt. Op dit principe berust de penetrograaf.
- Het oliedrukprincipe. De Iw wordt geregistreerd door middel van de druk die door een met de sondeerstang verbonden plunjer op een oliebad in een gesloten ruimte wordt uitgeoefend. De ontwikkelde druk wordt afgelezen op een manometer. Het toestel van Barendsen werkt op deze wijze.
- Het electromechanisch principe. De Iw wordt geregistreerd door middel van een krachtdoos. In een krachtdoos wordt de vervorming van een speciaal gevormd stuk roestvrij staal gemeten met behulp van rekstrookjes. Door de vervorming van het staal worden de rekstrookjes langer of korter, waardoor de elektrische weerstand verandert. Deze weerstandsverandering komt overeen met een bepaalde kracht, waaruit de Iw in kPa kan worden berekend.

2.2. Instrumentfactoren

Op veel plaatsen is onderzoek naar de indringingsweerstand gedaan en zijn penetrometers ontwikkeld. Dit heeft tot gevolg gehad dat er veel verschillende typen in omloop zijn en dat er van standaardisatie niet of nauwelijks sprake is. Hierdoor is het moeilijk om gegevens onderling te vergelijken. Een aantal instrumentfactoren die de Iw bepalen zijn:

- 1) Grootte van de conus
- 2) Grootte van de tophoek van de conus
- 3) Aard van het oppervlak van de conus
- 4) Grootte van de verhouding tussen de basisdiameter van de conus en de diameter van de sondeerstang
- 5) Indringingssnelheid van de conus in de grond

Ad 1) De invloed van de grootte van de conus bij gelijkblijvende vorm (= gelijke tophoek van de conus) wordt weergegeven in fig. 2.1 (FREITAG, 1968). Uit deze figuur is af te lezen dat de grootte van de I_w niet recht evenredig is met de basisoppervlakte van de gebruikte conus.

BEUVING (1981) en TIJINK en VAANDRAGER (1983) hebben ook gevonden dat de relatie tussen de I_w en het conusoppervlak niet lineair is (tabel 2.1 en 2.2). Hierbij dient opgemerkt te worden dat de resultaten van BEUVING voor de eerste centimeters in de grond gelden, terwijl de gegevens van TIJINK en VAANDRAGER voor een diepte van 5 tot 15 cm gelden.

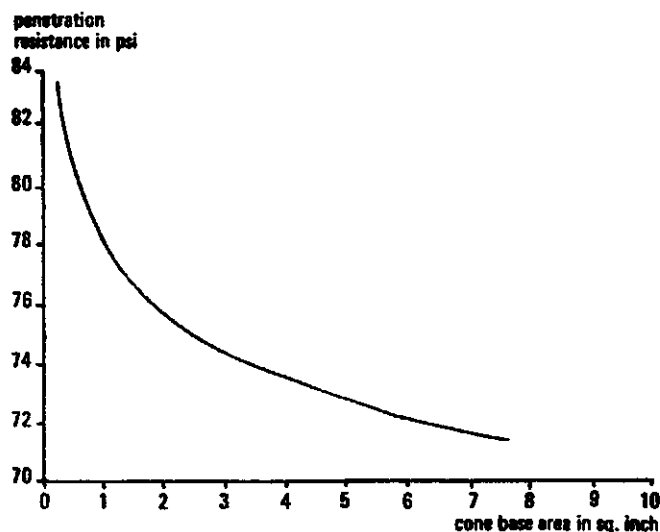


Fig. 2.1 Verband tussen indringingsweerstand en oppervlakte van de conusbasis bij gelijkblijvende tophoek (FREITAG, 1968)

Tabel 2.1. Factoren waarmee de manometeraflecting van penetrometertype 1 en 2 (standaardconus 5 respectievelijk 1 cm²) moet worden vermenigvuldigd om de penetrometerweerstand in MPa uit te drukken (BEUVING, 1981)

Tophoek van de beide conussen in °	basisoppervlak in cm ²	vermenigvuldigingsfactor naar conus met een 2 cm ² basis
60	1	1,29
60	3,2	0,88
30	1	1,37
30	3,2	0,86

Tabel 2.2. Vermenigvuldigingsgetallen voor het berekenen van de CI van conussen met 1 cm² en 3.2 cm² basisoppervlak naar een conus met een 2 cm basis (TIJINK en VAANDRAGER, 1983)

Basisoppervlak conus (cm ²)	Omrekeningsfactoren fabriek, uit verhouding basisoppervlakken		Uit veldmetingen	
	type 1	type 2	type 1	type 2
0,5	10,0	2,0	9,011 ± 0,574	1,842 ± 0,051
1,0	5,0	1,0	5,0	1,0
2,5	2,0	0,4	2,409 ± 0,126	0,479 ± 0,018
5,0	1,0	0,2	1,439 ± 0,052	0,291 ± 0,007
10,0	0,5	0,1	0,862 ± 0,052	0,179 ± 0,005

Ad 2) Naar de invloed van de grootte van de tophoek van de conus is onderzoek verricht door GILL (1968). Hieruit bleek dat er een optimale tophoek bestaat voor het verrichten van Iw-metingen met een conus-vormig meetlichaam. Deze optimale tophoek ligt tussen 30° en 60° en blijkt van grond tot grond verschillend te zijn. GILL stelde dit vast aan de hand van metingen aan drie verschillende gronden (fig. 2.2).

Mede op grond van het onderzoek van GILL is het internationaal gebruikelijk om de ASAE(A)-conus met een basisoppervlak van 3.2 cm² (0.5 inch²) of de ASAE(B)-conus met een basis van 1.3 cm² (0.2 inch²) toe te passen. Beide conussen hebben een tophoek van 30°.

Onderzoek van TIJINK en VAANDRAGER (1983) leverde ook bij een tophoek van 30° een minimumwaarde van de Iw op (fig. 2.3).

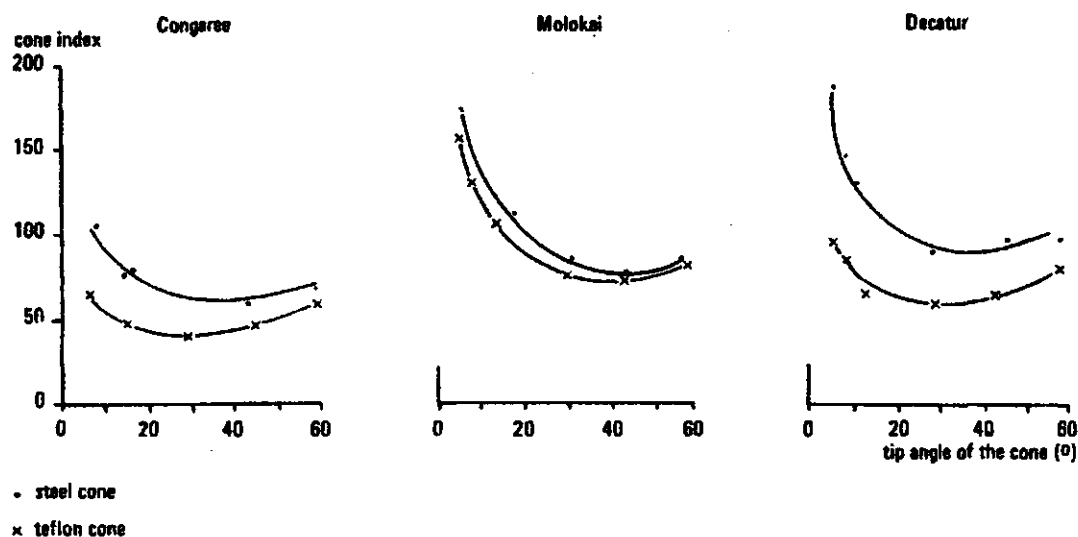


Fig. 2.2. Verband tussen conusindex en de tophoek van de conus voor drie verschillende gronden: Congaree: silt loam (GILL, 1968)
 : Molokai: silty clay
 : Decatur: silty clay loam

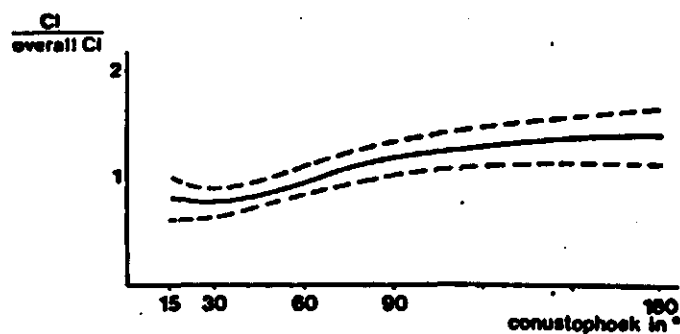


Fig. 2.3. Verband tussen conustophoek en overall CI (TIJINK en VAANDRAGER, 1983)

Ad 3) De aard van het oppervlak van de conus is eveneens van invloed op de grootte van de lw. In het onderzoek naar de invloed van de grootte van de tophoek heeft GILL (1968) gebruik gemaakt van zowel een stalen conus als van een conus met een teflon-kunststof oppervlak. Fig. 2.2 geeft eveneens een indruk van de invloed van de aard van het

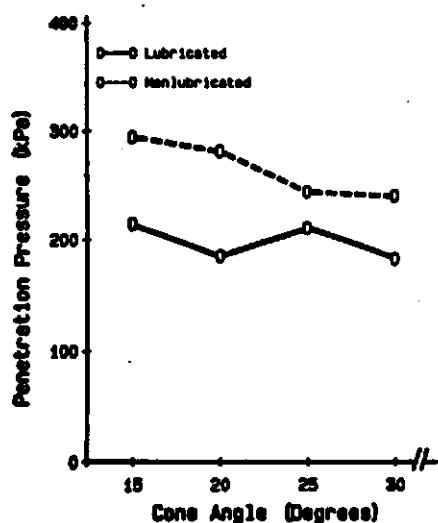


Fig. 2.4. Relatie tussen de Iw en de conustophoek, en het niveau van verdichting voor de penetrometer (non-lubricated) en de impedometer (lubricated) (TOLLNER, 1984)

conusoppervlak. De metingen met de teflon conus aan de Molokai-grond zijn niet geheel vergelijkbaar met die van de twee andere gronden, omdat voor deze metingen een wat andere, minder gladde teflon is gebruikt, waardoor de waarden van de gemeten weerstanden dicht bij die van de metingen met een stalen conus zijn komen te liggen (GILL, 1968).

Ook zijn er conussen ontwikkeld, waarbij tijdens de sondering door fijne gaatjes in de top van de conus een smeermiddel (polymeer) naar buiten wordt geperst, zodat er een glijlaag ontstaat tussen de conus en de gronddeeltjes. Dit heeft tot gevolg dat de Iw lager wordt (fig. 2.4). Dit soort penetrometer wordt ook wel impedometer genoemd (TOLLNER, 1984).

Ad 4) De verhouding tussen de basisdiameter van de conus en de diameter van de sondeerstang is van invloed op de grootte van de Iw (FREITAG, 1968).

Wanneer deze verhouding ongeveer 1 is, dus wanneer de conusbasis en de sondeerstang dezelfde diameter hebben, dan treedt vooral in de zwaardere kleigronden kleef aan de sondeerstang op, hetgeen registratie van de kleefweerstand tot gevolg heeft, die de reële Iw vele malen kan overtreffen. De kleefweerstand is een gevolg van de adhesie tussen de

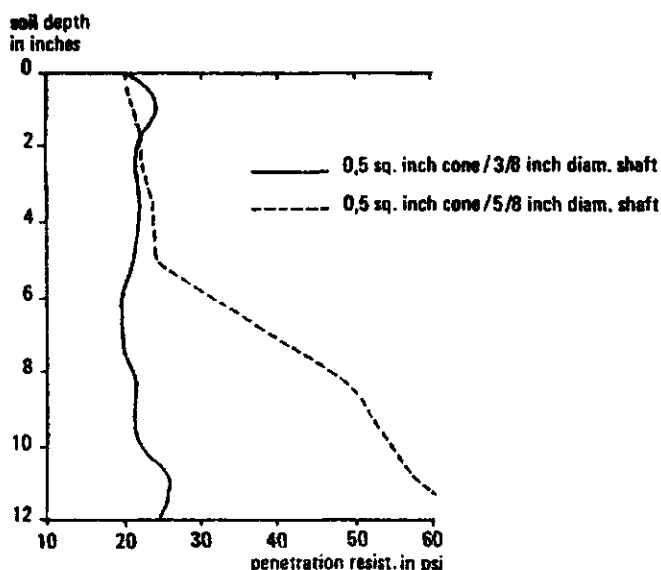


Fig. 2.5. Invloed van de verhouding tussen de basisdiameter van de conus en de diameter van de sondeerstang op de grootte van de indringingsweerstand (FREITAG, 1968)

grond en de sondeerstang (FREITAG, 1968). Fig. 2.5 geeft een indruk van de mate waarin de kleefweerstand de I_w kan overtreffen.

De kleef van de grond aan de sondeerstang is in belangrijke mate een functie van het lutumgehalte. Kleef kan grotendeels voorkomen worden door de sondeerstangdiameter veel kleiner te maken dan de conusdiameter.

Ad 5) De indringingssnelheid van de conus in de grond blijkt van invloed te zijn op de grootte van de I_w . FREITAG (1968) en TURNAGE en FREITAG (1969) hebben ondermeer hiernaar onderzoek verricht en kwamen tot de volgende conclusies:

- Het effect van verschillen in indringingssnelheid van de conus blijkt in kleigronden veel groter te zijn dan in zandgronden; dit in verband met het plastische karakter van kleigronden. Een zekere relatie met het lutumgehalte is dus aanwezig.
- Bij kleigronden is de gevoeligheid voor verschillen in indringingssnelheid het grootst juist in het traject waarin men over het algemeen werkt bij met de hand uitgevoerde I_w -metingen, namelijk van 0 tot 30 kgf/cm².

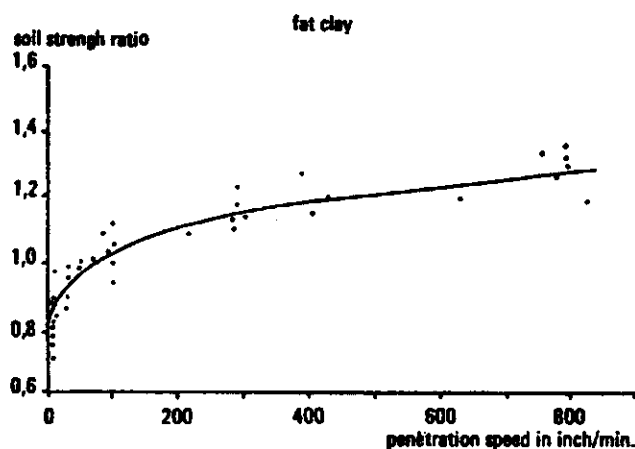


Fig. 2.6. Verband tussen de soil strength ratio (= de verhouding tussen de actuele soil strength vastgesteld onder gestandaardiseerde omstandigheden) en de indringingssnelheid van de conus (TURNAGE en FREITAG, 1969)

Het verband tussen indringingssnelheid en I_w is een parabolische functie (fig. 2.6; TURNAGE en FREITAG, 1969).

De AMERICAN SOCIETY of AGRICULTURAL ENGINEERS (1969) geeft bij de standaardisatie van de penetrometer een conussnelheid van 30.5 mm/s. SOANE (1970) vermeldt ook deze snelheid als een veelgebruikte. Bij met de hand bediende penetrometers, waarop men bij routineonderzoek voor landbouwkundige doeleinden is aangewezen, is het erg moeilijk om de indringingssnelheid constant te houden. Daarom kan hier altijd een bron van onnauwkeurigheid aanwezig zijn.

TURNAGE en FREITAG (1969) stelden vast dat bij gemiddeld een verdubbeling van de indringingssnelheid een verhoging van de I_w met ongeveer 10% optreedt. Volgens PONTE (1977) is de conussnelheid niet van grote invloed op de I_w in niet verzadigde zandgronden.

Een essentieel verschil tussen de I_w -metingen voor landbouwkundig gebruik en in de civiele techniek is dat de laatste zich voornamelijk op diepere grondlagen richt, terwijl voor landbouwkundig gebruik voornamelijk de bovenste meter interessant is. Omdat het principe hetzelfde is, zullen de kenmerken van de in de civiele techniek gebruikte sonderingen toch in het kort besproken worden.

In het grondmechanisch onderzoek dat vooral gericht is op funderingsdoeleinden, is, zeker in Nederland, de penetrometer veel meer gestandaardiseerd. Er wordt een conus met een tophoek van 60° en een oppervlak van 10 cm^2 gebruikt. De conus heeft een aparte vorm en de metingen gebeuren mechanisch of elektrisch. Bij het mechanisch sonderen wordt de druk, die door de grond op de conus wordt uitgeoefend door de binnenstangen overgebracht naar het bovengrondse meetlichaam. Bij elektrisch sonderen wordt de druk, die door de grond op de conus wordt uitgeoefend, gemeten door het direkt boven de conus geplaatste meetelement. De meetwaarde wordt door een kabel toegevoerd aan het bovengrondse uitleesapparaat (fig. 2.7; VAN REE, 1977).

Een speciale vorm heeft de Begemann-conus, waarmee de conusweerstand, de plaatselijke kleef en de totale wrijvingsweerstand apart gemeten kan worden. (fig. 2.8; VAN REE, 1977).

De sonderingen worden steeds meer gemaakt vanuit zelfrijdende trucks, die geballast kunnen worden tot ongeveer 200 kN.

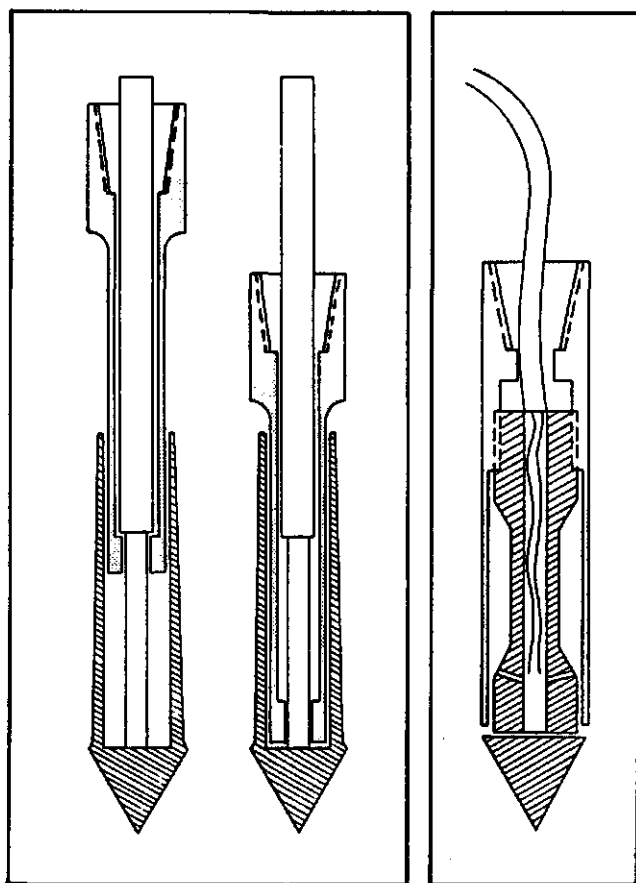


Fig. 2.7. Mechanische en elektrische conus (VAN REE, 1977)

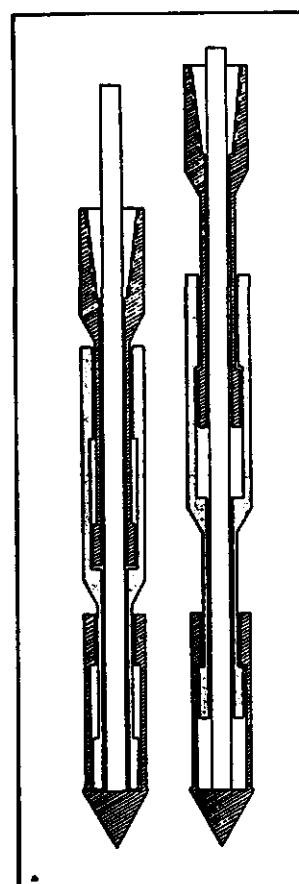


Fig. 2.8. Begemann-conuss (VAN REE, 1977)

2.3. Theorieën

2.3.1. Berekening van het puntdraagvermogen of conusweerstand

In de grondmechanica is veel aandacht besteed aan de theoretische achtergrond van het sonderen. Er bestaan vele klassieke theorieën die een analytische oplossing geven voor het puntdraagvermogen van een paal. Indien we de conus als een paal met een kleine diameter beschouwen, kunnen deze theorieën ook toegepast worden om een theoretische waarde voor de conusweerstand te verkrijgen. De meeste van deze theorieën zijn uitbreidingen voor oplossingen betreffende het draagvermogen q_0 van een ondiepe stripfundering, waarvoor oplossingen meestal worden gepresenteerd in de vorm:

$$q_0 = c \cdot N_c \cdot \zeta_c + p_0 \cdot N_q \cdot \zeta_q + 1/2 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot \zeta_\gamma \quad (1)$$

In deze uitdrukking is:

q_0 = bezwijkdraagvermogen

c = cohesie

p_0 = korrelspanning op het funderingsniveau

γ = volumieke massa

B = breedte van de strip

$\zeta_c, \zeta_q, \zeta_\gamma$ = vormfactoren

N_c, N_q, N_γ = factoren voor het draagvermogen, afhankelijk van ϕ

Een overzicht van de verschillende bezwijkpatronen die ten grondslag liggen aan de diverse theorieën voor de puntweerstand voor diepe funderingen is weergegeven in fig. 2.9.

Ofschoon de bezwijkpatronen verschillend zijn blijft uitdrukking (1) in gebruik voor diepe funderingen. Gezien de geringe bijdrage van de laatste term in (1) voor diepe funderingen resulteert dit in:

$$q_0 = c \cdot N_c \cdot \zeta_c + p_0 \cdot N_q \cdot \zeta_q \quad (2)$$

Voor de cirkelvormige of vierkante paalvorm wordt vaak gebruik gemaakt van de factoren $N_c^* = \zeta_c \cdot N_c$ en $N_q^* = \zeta_q N_q$.

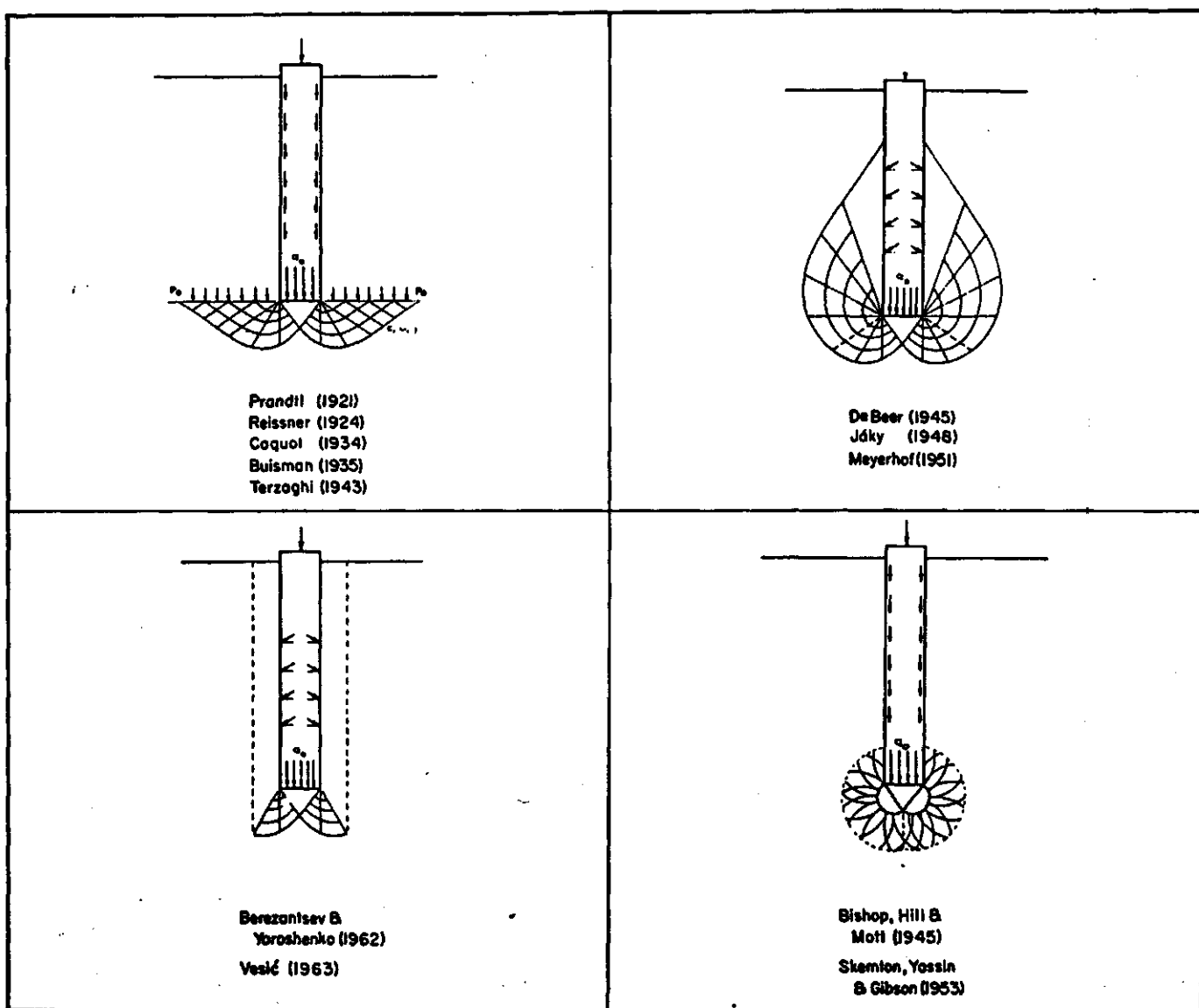


Fig. 2.9. Bezwijkpatronen klassieke theorieën (PONTE, 1977)

In het algemeen kan als bezwaar tegen deze theorieën worden aangevoerd dat de invloed van de deformatie van de grond en de horizontale spanningstoestand niet in beschouwing wordt genomen. Meer recente theorieën leggen het verband tussen de puntweerstand en de druk die benodigd is voor de expansie van een holle ruimte. Men kan zich voorstellen dat het indringen van een conus gepaard gaat met de expansie van een holle ruimte. De geëxpandeerde holle ruimte kan worden voorgesteld door het nieuwe volume dat door de penetrerende conus of paal wordt ingenomen. Ofschoon het uiteindelijke resultaat van de sondering een cilindrisch gat is, dat wordt ingenomen door de paal of sondeerstangen, is de expansie noch cilindrisch noch bolvormig. Het bezwijkpatroon dat hierbij wordt aangehouden is weergegeven

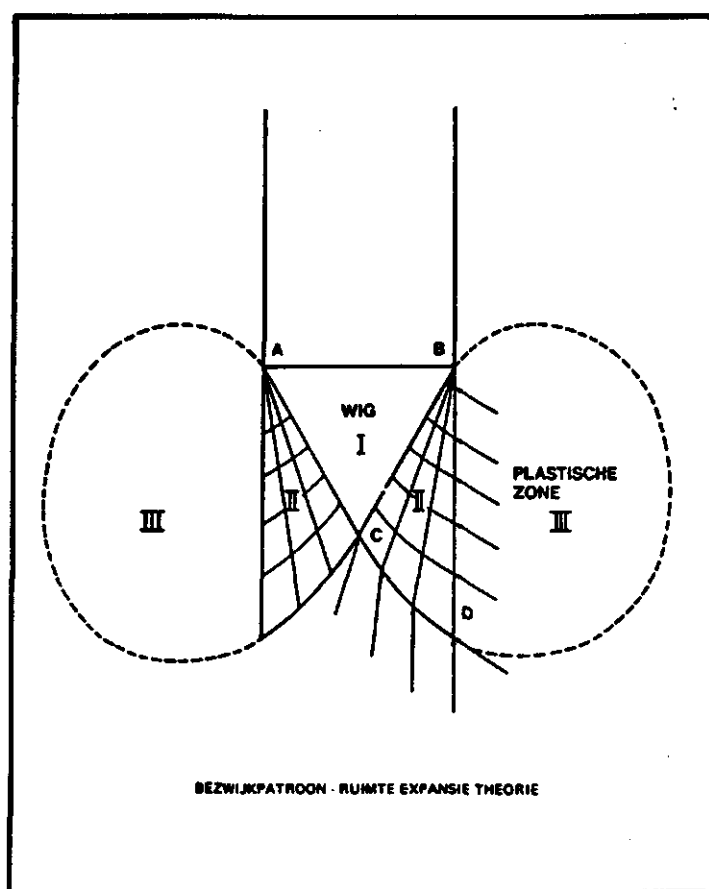


Fig. 2.10. Bezwijkpatroon ruimte-expansie theorie (PONTE, 1977)

in fig. 2.10. De sterk samengedrukte wig I drukt in dicht zand de zone II zijwaarts in de plastische zone III. Voortgang van het penetrerende lichaam wordt dus mogelijk gemaakt door de zijdelingse expansie van de grond langs de cirkelvormige ring BD, alsmede door elke mogelijke samendrukking binnen de zones I en II.

Gebaseerd op het in figuur 2.10 weergegeven bezwijkpatroon kan volgens VESIC een benaderende waarde voor N_q^* worden bepaald door de gemiddelde normaalspanning langs de ring BD gelijk te stellen aan de limietdruk die benodigd is om een bolvormige holle ruimte in een oneindig uitgestrekte grondmassa te expanderen. Deze massa wordt verondersteld zich elastoplastisch te gedragen met sterkte-parameters en deformatie-parameters. Volgens onderzoeken van VESIC wordt de puntweerstand niet beheerst door de verticale korrelspanning maar door de isotrope spanning, \bar{q} . De formule voor het draagvermogen (2) wordt volgens bovenstaande theorie dan herzien in:

$$q_0 = c \cdot N_c^* + \bar{q} \cdot N_q^* \quad (3)$$

Uitgaande van de ruimte-expansie theorie kan worden aangetoond dat er geen lineair verband bestaat tussen conusweerstand en diepte maar dat de conusweerstand op grotere diepte minder snel toeneemt. (PONTE, 1977).

Volgens FARREL en GREACEN (1966), die onderzoek hebben gedaan met conussen met een diameter van 3 mm en kleiner, kan de weerstand van een grond tegen de punt van een sondeerapparaat worden berekend met behulp van de druk die nodig is om bij radiale compressie van de grond een bolvormige holte te vormen, die groot genoeg is om de conuspunt te bevatten. De conus moet dan wel stomp zijn, dat wil zeggen een tophoek van 60° of groter hebben. De verdichting rond de conus vindt door de radiale en tangentiale spanning zowel in een plastische als een elastische zone rond de conus plaats. De plastische zone wordt onderscheiden in drie deelzones:

I : vervorming tot een minimum poriëngehalte

II : vervorming volgens de VRF (Voids Ratio line at Failure) lijn

III: vervorming volgens de Reboundcurve

In zone IV is de vervorming elastisch.

Deze zones zijn weergegeven in fig. 2.11a en b.

De radiale spanning wordt berekend als een functie van de interne druk en de radiale afstand r van de punt van de conus. Aannemende dat de hoofdspanningen in de grond nabij de conus, de radiale σ_{ra} en de tangentiale σ_{ta} , nodig zijn om de holte te vormen, dan volgt uit fig. 2.11.c dat de normaalspanning op het oppervlak van de conuspunt is:

$$\sigma_N = 1/2(\sigma_{ra} + \sigma_{ta}) + 1/2(\sigma_{ra} - \sigma_{ta}) \cos \Psi,$$

$$\tan \phi' = (\sigma_{ra} - \sigma_{ta}) \sin \Psi / 2\sigma_N,$$

als ϕ' de coëfficiënt van de grond-metaal wrijving is en

Ψ de richting van de hoofdspanningen aangeeft

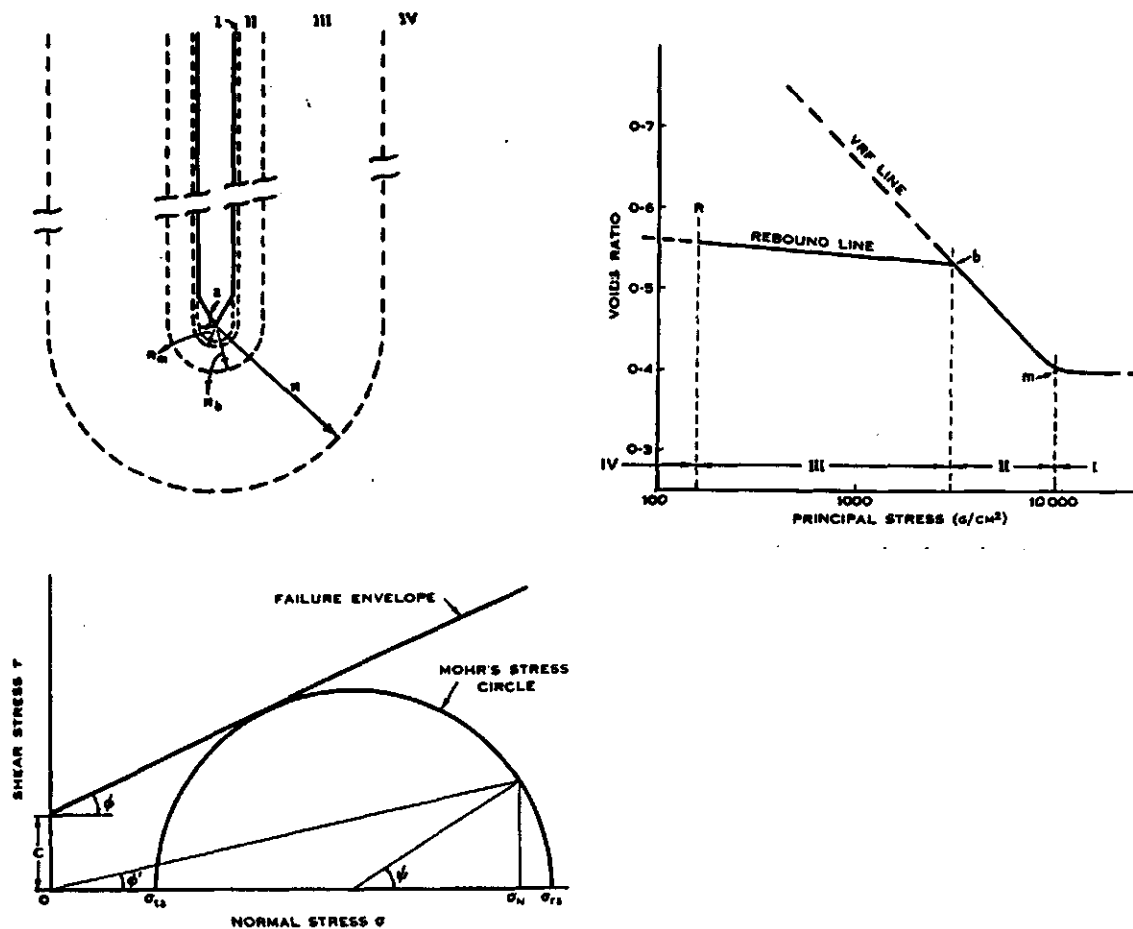


Fig. 2.11. Verdichtingszones (a), verdichtingscurves (b) en de spanningsverdeling bij de basis van de conus (c) volgens de bolvormige-holte theorie (FARREL en GREACEN, 1966)

Hieruit volgt dan dat de puntweerstand is:

$$q = \sigma_N \cos \phi' (1 + \tan \phi' \cot \alpha),$$

α = de halve hoek van de conuspunt

Voor een scherpe conuspunt, waarbij de tophoek 10° is, geeft het bolvormige model een overschatting van de gemeten waarden met een factor drie. Het cilindrische model geeft voor een scherpe conus betere waarden, maar de puntweerstand wordt onderschat omdat de conus geen oneindig fijne punt heeft (GREACEN et al., 1968).

2.3.2. Spanningsverdeling en stromingsgedrag

Naast de theorieën en modellen over de grootte van de conusweerstand die ontwikkeld zijn, is er ook onderzoek gedaan naar de spanningsverdeling en het stromingsgedrag van de grond tijdens een sondering. Bij het binnendringen van de conus in de grond ontstaat er door de druk op de grondkorrels een spanning in de grond. Deze spanningsverdeling is door ALLERSMA (1982) in beeld gebracht (fig. 2.12a). Met behulp van de computer is dit beeld omgezet in spanningstrajectoriën en spanningsverdelingen (fig. 2.12b en c). Ook zijn de verplaatsingen van de grondkorrels tijdens een sondering in beeld gebracht (fig. 2.12d).

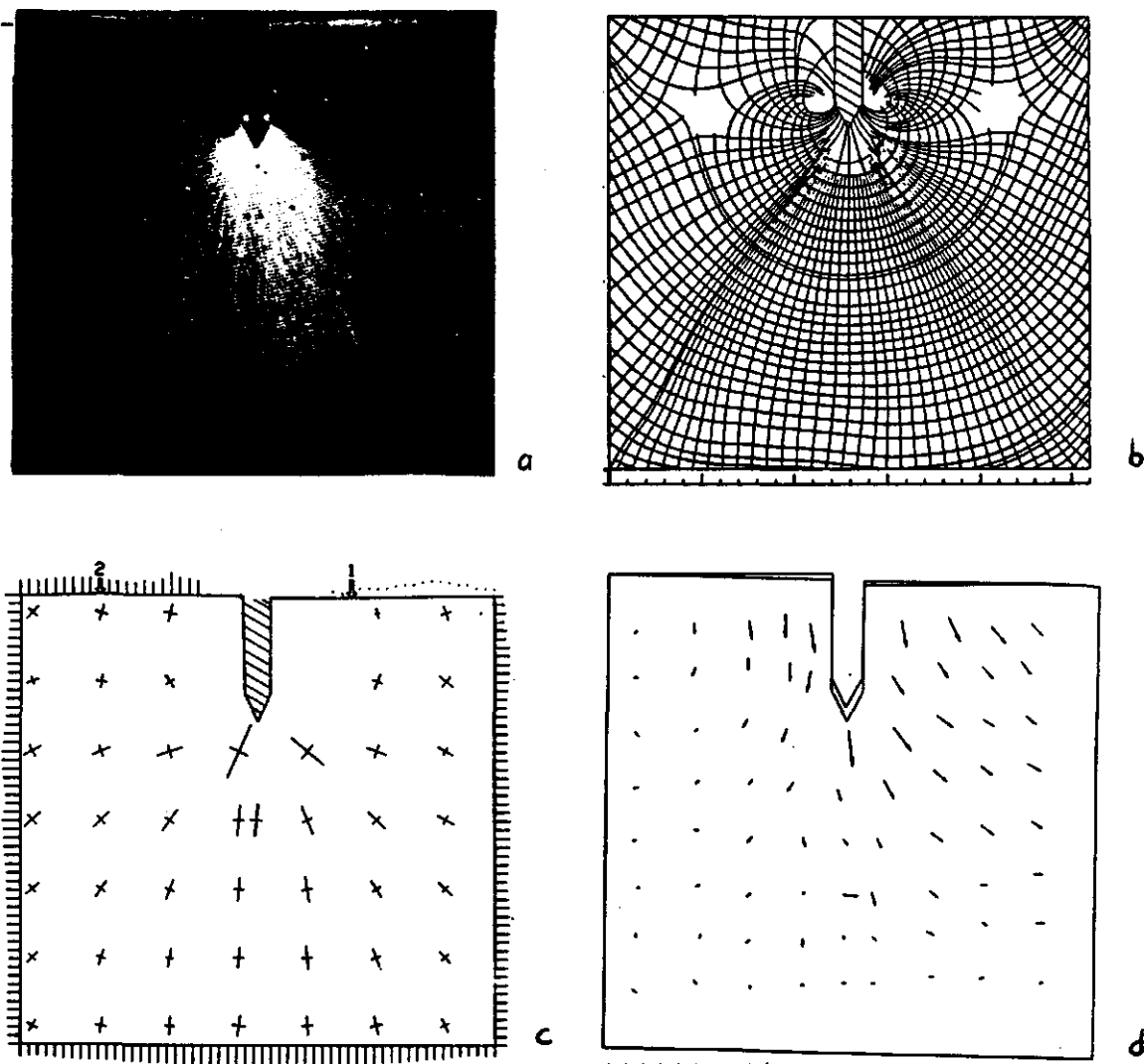


Fig. 2.12. Spanningsverdeling (a), spanningstrajectoriën (b) berekende spanningsverdeling (c) en verplaatsingen van grondkorrels (d) tijdens een sondering (ALLERSMA, 1982)

Volgens KOOLEN en KUIPERS (1983) bestaan er verschillende "stromings-beelden" van grond tijdens de sondering. Het criterium hiervoor is of de grond nog verdichtbaar is of niet (fig. 2.13a en b).

Röntgenfoto's van 2 mm dikke grondplaatjes genomen langs de sonderingsgaten zijn door GREACEN et al. (1968) gemaakt. In fig. 2.14 zijn (a) een stompe conus, (b) een scherpe conus en (c) een 1 mm dikke wortelpunt van een erwt afgebeeld. In dezelfde figuur zijn de gemeten volumieke massa-patronen weergegeven als een functie van r^* , de relatieve radiale afstand tot het centrum van het sonderingsgat. Hierbij is $r^* = r/a$ als a de straal van het gat is. De theoretische verdeling van de volumieke massa van de grond rond de gaten, gebaseerd op de analyse van het type conus (zie par. 2.3.1) en de grondcondities is weergegeven als een doorgetrokken lijn.

BUTTERFIELD en ANDRAWES (1977) hebben een theorie ontwikkeld die voor wigvormige elementen de I_w berekent. Voor lage dichtheden blijkt de uitkomst redelijk te kloppen, terwijl voor hogere dichtheden de berekende weerstand te hoog is. Opvallend is ook dat de stroming van de grond bij hoge dichtheden niet continue plaats vindt, maar schoksgewijs via afschuifvlakken naar het oppervlak toe (fig. 2.15 en

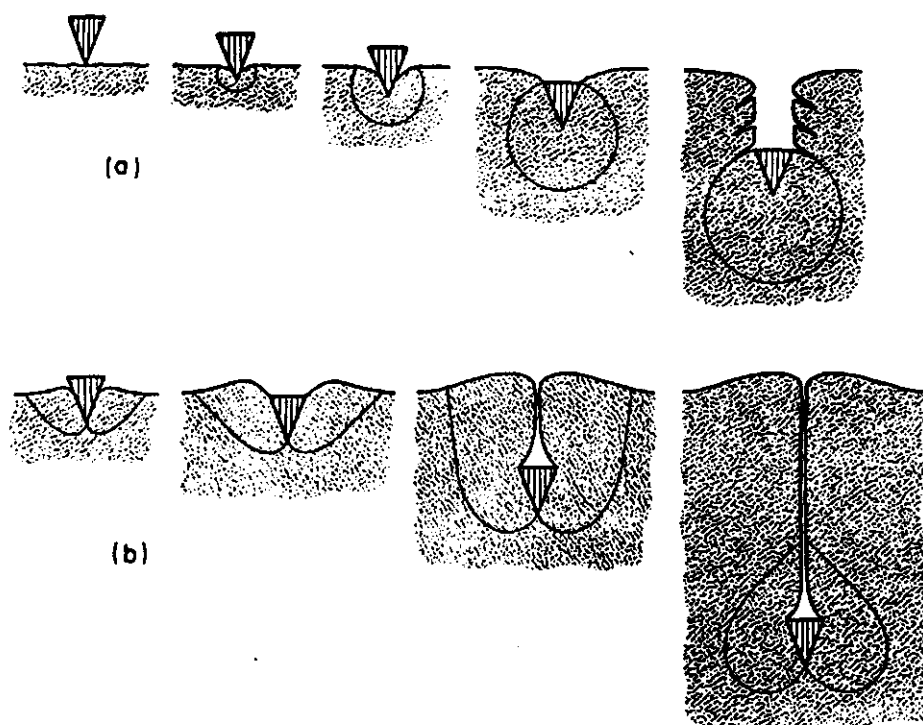


Fig. 2.13. Een wig penetrerend in een gemakkelijk verdichtbare (a) en een niet verdichtbare grond (b) (KOOLEN en KUIPERS, 1983)

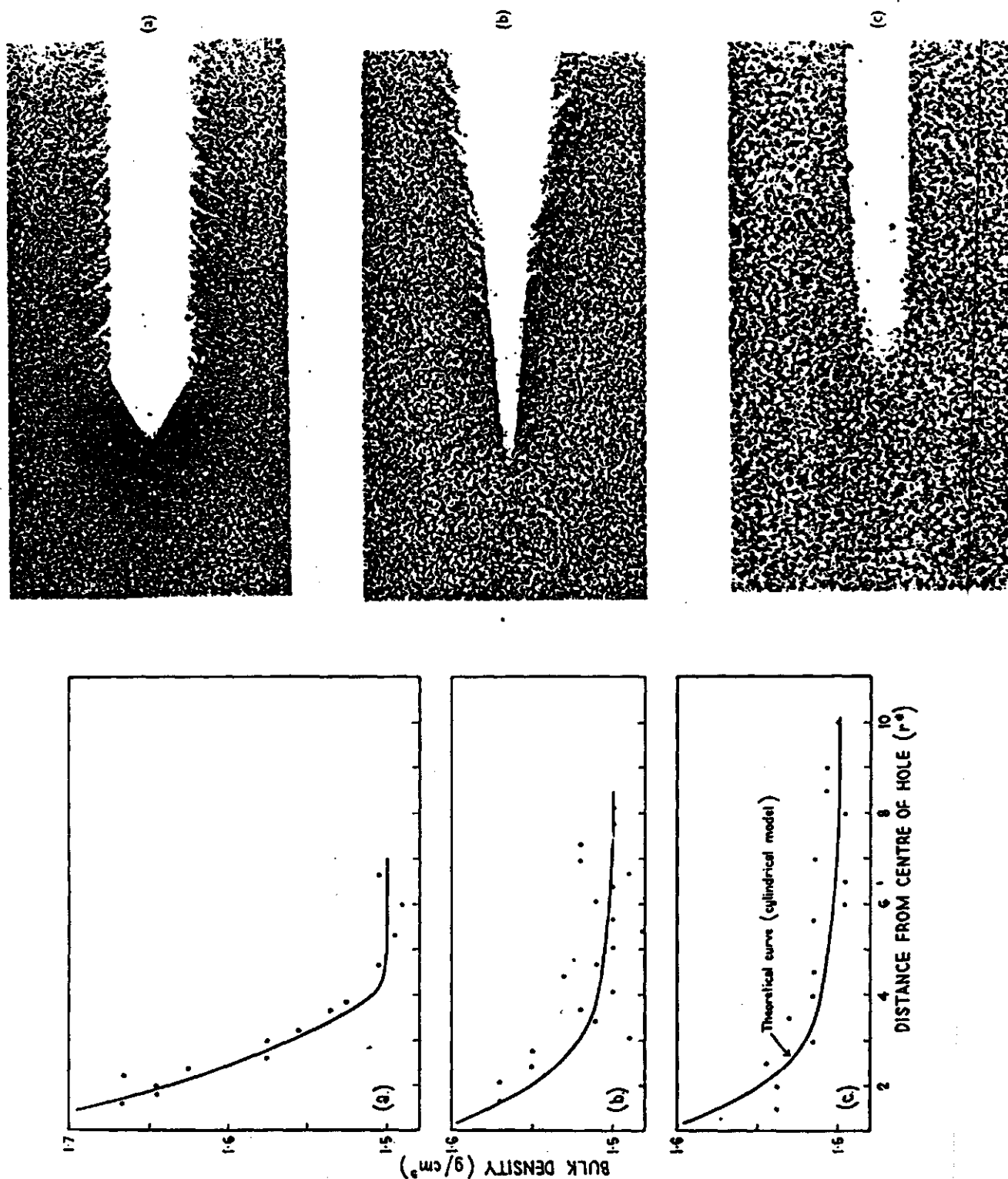


Fig. 2.14. Verandering van de dichtheid rond een penetratiegat gemeten met de begeleidende röntgenfoto's (afgedrukte punten) voor (a) een 3 mm stompe conus, $\alpha = 30^\circ$, (b) een 3 mm scherpe conus, $\alpha = 5^\circ$, en (c) een 1 mm wortelgat in Parafield loam ($\gamma = 1.5 \text{ g/cm}^3$, $h = 0.3 \text{ bar}$). De getrokken lijn geeft de theoretische verandering weer. (GREACEN et al. 1968)

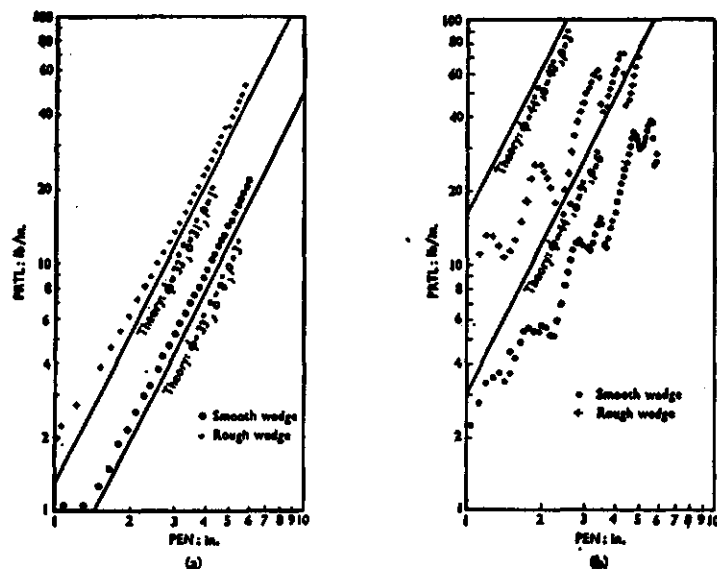


Fig. 2.15. Vergelijking van de gemeten indringingsweerstand en die berekend met de theorie voor (a) los zand en (b) dicht zand (BUTTERFIELD en ANDRAWES, 1977)

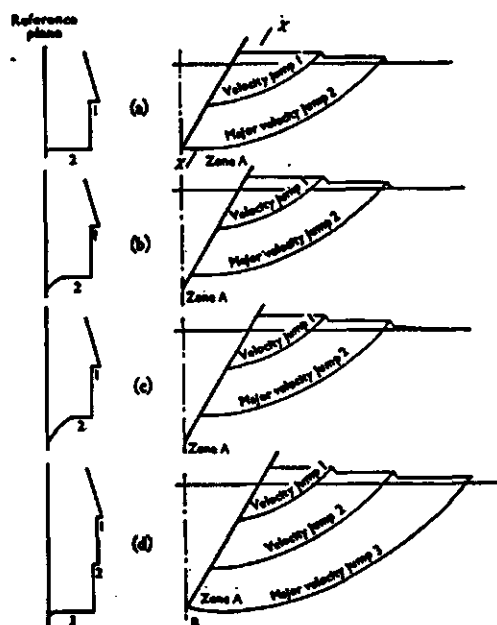


Fig. 2.16. Schetsen die het mechanisme tonen van afschuifvlakken in dicht zand (BUTTERFIELD en ANDRAWES, 1977)

2.16). Dit gebeurt tot de hele wigvorm in de grond gedrukt is. In dit geval is dat ongeveer 20 cm. Bij een diepere indringing in de grond vindt de stroming van de grond wel weer continue plaats.

2.3.3. De invloedssfeer van de sondering

De dikte van een grondlaag om een volledig ontwikkeld stromingspatroon te krijgen is afhankelijk van de dichtheid van de grond. De dichtheid is bij cohesieloos zand gerelateerd aan de hoek van inwendige wrijving. BEGEMANN geeft dit aan in fig. 2.17. Uit deze figuur blijkt dat de diepte die nodig is om de maximale I_w te krijgen tot meer dan 20 maal de diameter van de conus kan oplopen. De invloed beneden de basis van de conus bedraagt 3 tot 4 maal de diameter. De horizontale straal waarover de penetratie van invloed is blijkt volgens de theorie van BEGEMANN maximaal 9 maal de diameter te zijn.

Deze afstand r wordt berekend met de formule:

$$r = d \cdot e^{\beta \tan \phi} \quad (\text{SANGLERAT, 1972})$$

De met het model van FARREL en GREACEN berekende horizontale stralen zijn kleiner dan die volgens BEGEMANN. Uit tabel 2.3 blijkt de maximale straal voor de elastische vervorming ongeveer 5 maal de diameter van de conus te zijn.

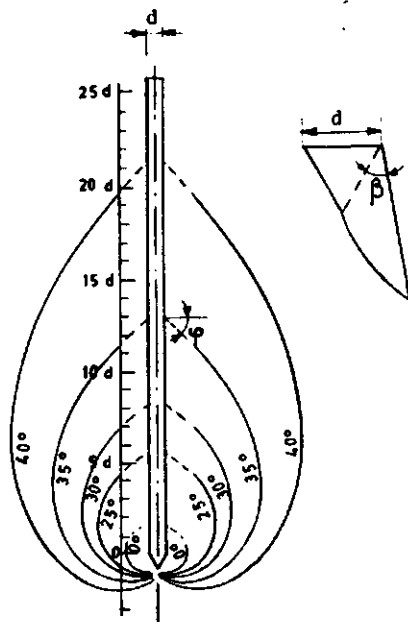


Fig. 2.17. Maximale invloed van een conus bij verschillende dichtheden (SANGLERAT, 1972)

Tabel 2.3. Berekende waarden van de stralen voor de verschillende elastsiche en plastische zones (FARREL en GREACEN, 1966)

Soil	Suction (b)	Density (g/cm ³)	Radii of Compression Zones			Change in Void Vol./Area of Probe			
			R_m^*	R_c^*	R^*	Min. Voids Zone	VRF Zone	Rebound Zone	Elastic Zone
Parafield loam	0.3	1.5	1.00	3.97	8.41	—	0.48	0.03	0.05
		1.6	1.00	3.31	9.46	—	0.36	0.16	0.08
		1.7	1.24	2.41	9.77	0.04	0.14	0.35	0.12
	0.7	1.5	1.00	3.64	8.71	—	0.40	0.10	0.06
		1.6	1.00	2.83	9.53	—	0.25	0.26	0.10
		1.7	1.05	2.02	9.49	0.01	0.10	0.41	0.13
Urrbrae loam	0.3	1.3	1.06	2.91	6.47	0.02	0.33	0.07	0.08
		1.4	1.36	2.58	6.18	0.08	0.20	0.14	0.11
		1.5	1.77	2.37	5.81	0.13	0.08	0.23	0.13
Coleraine clay	0.3	1.0	1.00	2.82	8.92	—	0.27	0.01	0.11
		1.1	1.18	2.33	5.81	0.04	0.16	0.07	0.15
		1.2	1.49	2.02	5.89	0.07	0.06	0.20	0.12

Bij wigvormige elementen is de maximale horizontale afstand ongeveer 10 maal de diameter van de wig, althans bij een wig met een tophoek van 20° . (Fig. 2.18; GILL, 1969).

Volgens SMITS (1977) is er bij de star-plastische theorie van VESIC wel onderscheid tussen een wigvormig lichaam en een conus. De wig heeft dan volgens figuur 2.19 een grotere horizontale invloedssfeer van de plastische zone dan de conus. Bij de wig is dat ongeveer 5.5

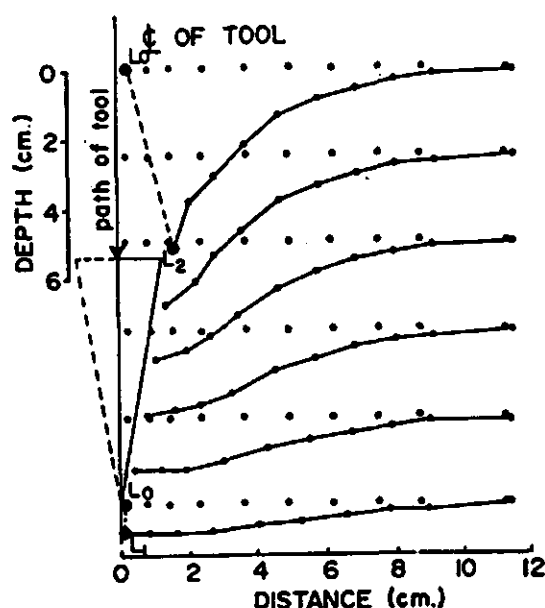


Fig. 2.18. Grondvervormingspatronen veroorzaakt door een stalen wig (25.7 mm breed) met een tophoek van 20° (GILL, 1968)

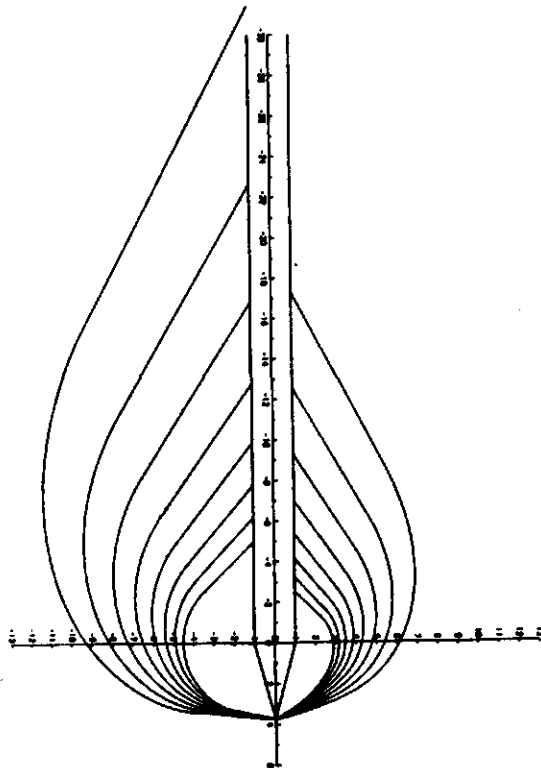


Fig. 2.19. Verschil tussen de invloed van een wigvormig (links) en een conusvormig (rechts) element (SMITS, 1977)

maal de diameter tegenover 3.5 maal de diameter bij het conusvormige element.

2.4. Beworteling en bewortelbaarheid

De penetrometer is een veelgebruikt instrument bij het bewortelingsonderzoek, alhoewel er ook enkele serieuze bezwaren aan kleven. Bij het vergelijken van het indringen van een wortel en een penetrometerconus in de grond zijn er een aantal essentiële verschillen:

- De penetrometerconus is veel groter dan een worteltop
- De penetrometerconus is een star geheel, terwijl de wortelpunt bij het binnendringen van een dichte laag kan zoeken naar een voldoende grote porie om verder te kunnen groeien
- De indringingssnelheid van de conus is ongeveer 100 000 maal groter dan de groeisnelheid van een wortelpunt

Ondanks deze verschillen is de I_w toch een duidelijke indicator voor de bewortelbaarheid gebleken. TAYLOR en GARDNER (1963) ontwikkelden empirische verbanden tussen de volumieke massa en de mate van wortelindringing van een grond bij verschillende vochtspanningen (fig. 2.20).

Fig. 2.21 toont het rechtlijnige verband tussen de I_w en de mate van wortelindringing. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze verbanden voor een specifieke grond gelden, namelijk Amarillo fine sandy loam. Als de volumieke massa van de grond hoger wordt, is de mate van wortelindringing steeds geringer (fig. 2.22; TAYLOR en BRUCE, 1968). Op een gegeven moment is de volumieke massa zo hoog dat er geen wortels meer kunnen binnendringen in de grond.

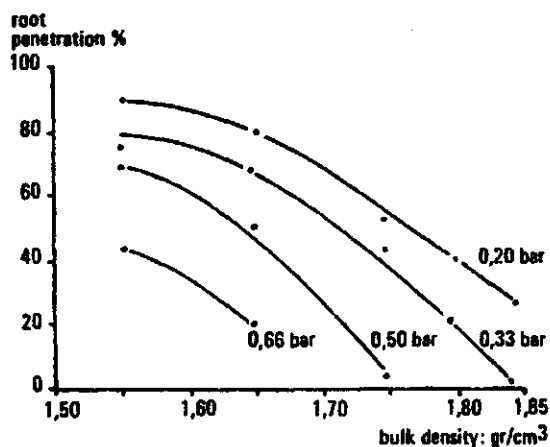


Fig. 2.20. Verband tussen wortelindringing en dichtheid bij verschillende vochtspanningen (TAYLOR en GARDNER, 1963)

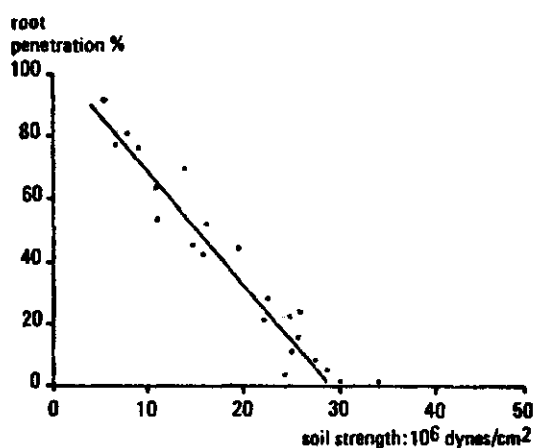


Fig. 2.21. Verband tussen wortelindringing en soil strength, gemeten bij veldcapaciteit (TAYLOR en GARDNER, 1963)

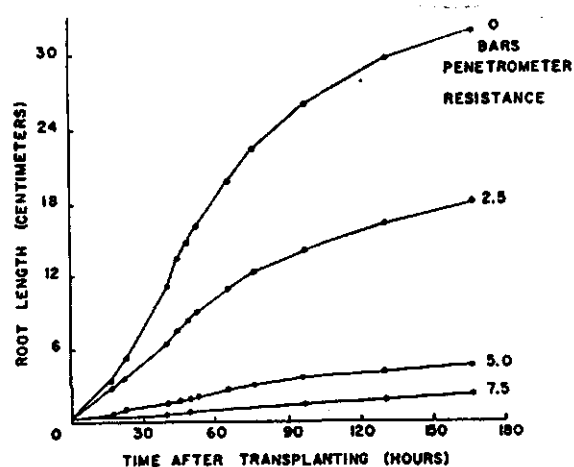


Fig. 2.22. Cumulatieve katoenwortellengte in de grond uitgezet tegen de tijd bij vier verschillende indringingsweerstand (TAYLOR en BRUCE, 1968)

Door vele onderzoekers is naar de Iw gezocht, die bij deze situatie gevonden wordt. TAYLOR en BURNETT (1964) vonden 25 - 30 kgf/cm², TAYLOR en BRUCE (1968) 20 kgf/cm² voor katoenwortels, terwijl CAMP en LUND (1968) 310 psi (= 30 kgf/cm²) als grenswaarde voor katoenwortels vonden. TAYLOR et al. gebruikten een cilindrische conus met een diameter van 0.48 cm (= 0.18 cm²) en een tophoek van 180° tot een diepte van 0.5 cm. CAMP en LUND gebruikten een conus met een oppervlak van 0.126 cm² en een tophoek van 60°.

In Nederland hebben VAN DAM en HULSHOF (1967) en HOUBEN (1970) op zandgronden veel Iw-metingen gedaan in verband met bewortelingsonderzoek. Ook zij kwamen tot de conclusie dat 30 kgf/cm² een uiterste grens is voor de beworteling. Bij hun onderzoek werd gebruik gemaakt van de Nederlandse conus met een oppervlak van 1 cm² en een tophoek van 60°.

BOONE et al. (1978) stelde dat de wortels in elke verdichte laag binnendringen, maar alleen met een zeer verschillende snelheid. De gemeten Iw kan alleen als index voor de weerstand gebruikt worden en is geen maat voor de kracht die groeiende wortels op de grond uitoefenen.

2.5. Relaties Iw, volumieke massa, vochtgehalte en vochtspanning

Bij het in de vorige paragraaf genoemde bewortelingsonderzoek zijn voor de verschillende gronden diverse relaties tussen een combinatie van de Iw, de volumieke massa van de grond, het vochtgehalte en de vochtspanning opgesteld. BARLEY et al. (1965) vonden dat een hogere vochtspanning een duidelijk hogere Iw bij een Parafield loam met dezelfde volumieke massa opleverde (fig. 2.23). TAYLOR en GARDNER (1963) vonden een soortgelijk beeld (fig. 2.24).

TAYLOR et al. (1966) hebben het onderzoek van TAYLOR en GARDNER voortgezet door soortgelijke relaties voor andere grondsoorten op te stellen. Zij hebben Columbia loam, Miles loamy fine sand, Naron fine sandy loam en Quinlan very fine sandy loam gebruikt (fig 2.25). Opvallend zijn de grote verschillen tussen de verschillende grondsoorten.

Anderen gebruikten niet de vochtspanning maar het vochtgehalte om de relatie tussen de Iw, de volumieke massa en de vochthoeveelheid uit te zetten. CAMP en LUND (1968) hebben de volgende relaties voor Norfolk fine sandy loam, Magnolia sandy loam en Greenville loam bepaald (fig. 2.26). Er is hierbij een penetrometerconus met een diameter van 4 mm gebruikt. FREITAG (1968) vond dat de volumieke massa uitgezet tegen de Iw gemeten bij veldcapaciteit van Yuma sand een bijna rechte lijn opleverde (fig. 2.27).

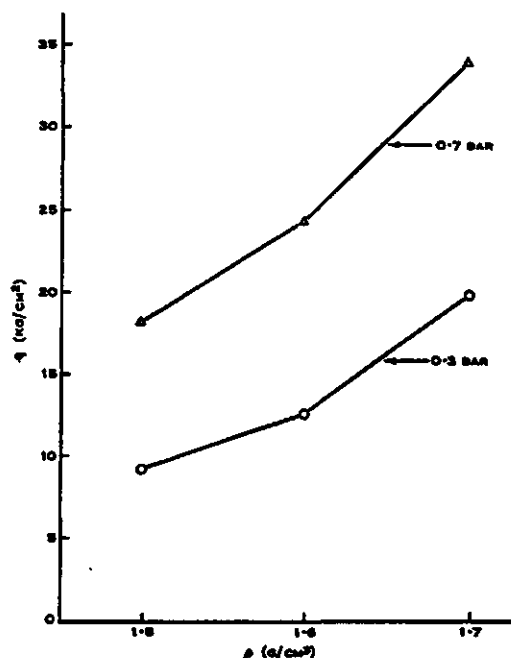


Fig. 2.23. Relatie tussen de indringingsweerstand en de dichtheid bij vochtspanningen van 0.3 en 0.7 bar (BARLEY et al., 1965)

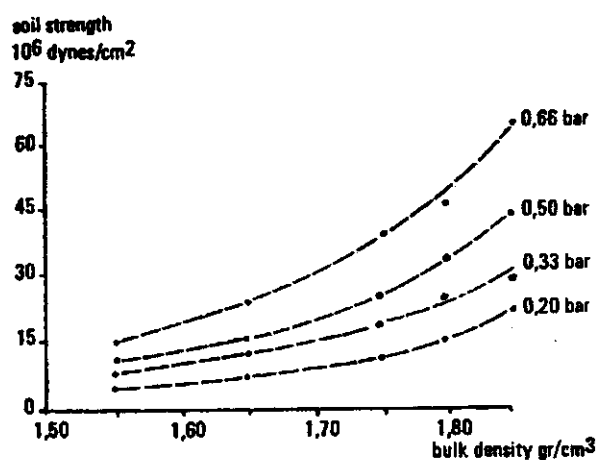


Fig. 2.24. Verband tussen de soil strength en dichtheid bij verschillende vochtspanningen (TAYLOR en GARDNER, 1963)

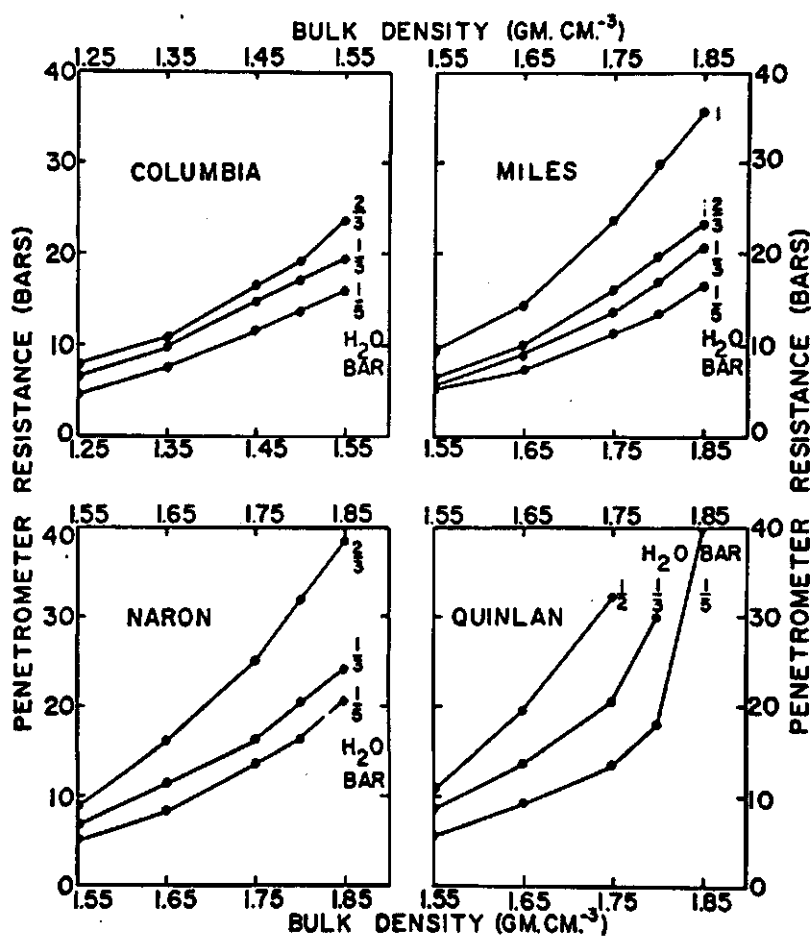


Fig. 2.25. Relaties tussen de indringingsweerstand, de dichtheid en de vochtspanning voor vier verschillende grondsoorten (TAYLOR et al., 1966)

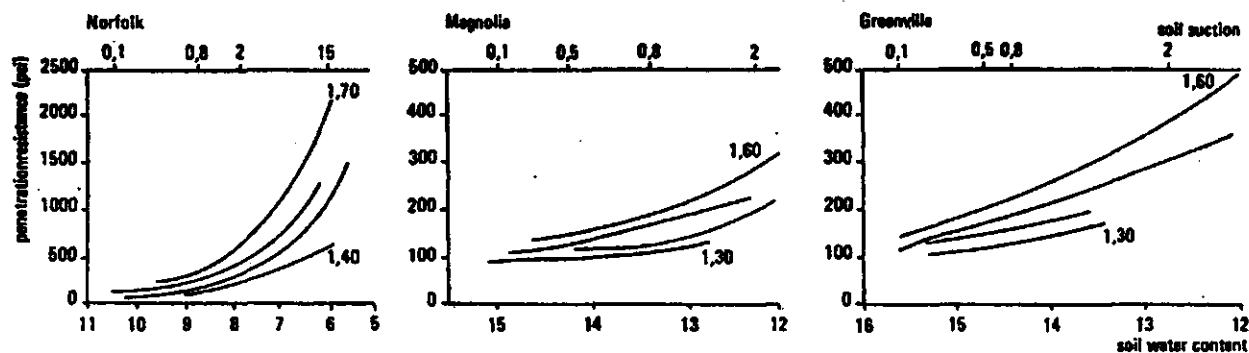


Fig. 2.26. Verband tussen de indringingsweerstand en het vochtgehalte bij verschillende dichtheden (CAMP en LUND, 1968)

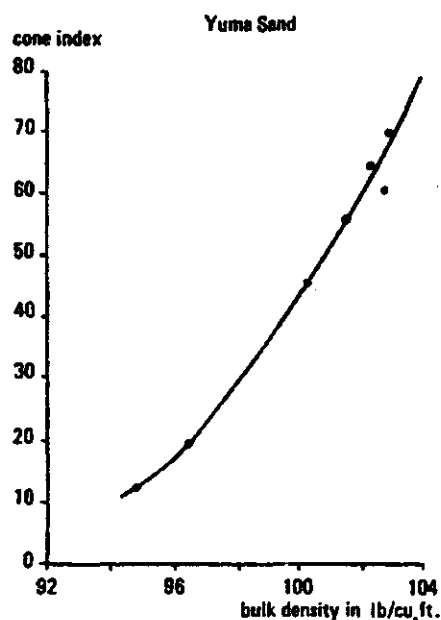


Fig. 2.27. Verband tussen de conusindex en de dichtheid (FREITAG, 1968).

BOONE et al. (1978) zet niet de volumieke massa tegen de penetrometerwaarde uit, maar het porienvolume (fig. 2.28).

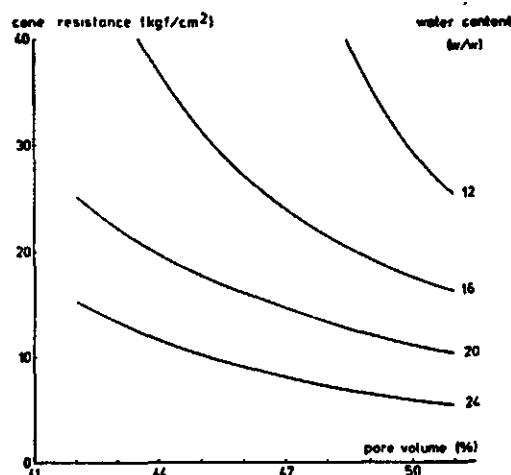


Fig. 2.28. Relaties tussen het poriënvolume en de indringingsweerstand bij verschillende vochtgehalten (BOONE et al, 1978)

2.6. De relatie vochtgehalte - vochtspanning

De relatie tussen het vochtgehalte en de vochtspanning, die de waterretentiecurve of pF-curve wordt genoemd, is een van de belangrijke fysische eigenschappen van de grond. De vorm van de curve hangt onder meer van het soort mineralen in de grond, de poriëngrootteverdeling en de structuur, af.

Het vochtgehalte bij een bepaalde vochtspanning is lager als de grond aan het drogen is (desorptielijn) dan wanneer hij natter wordt (absorptielijn). Dit verschijnsel wordt hysteresis genoemd. Als het watergehalte verandert, volgt de vochtspanning deze volgens de "scanning curves". De "scanning curves" blijven altijd binnen het oppervlak dat wordt gevormd tussen de desorptie- en de absorptielijn (fig 2.29: WARKENTIN, 1971) (KOOREVAAR et al., 1983).

Bij verdichting verandert de poriëngrootteverdeling en de structuur. De typische invloed van verdichting op de waterretentiecurve is weergegeven in figuur 2.30. De maximale hoeveelheid vastgehouden water van de grond bij verzadiging is door verdichting afgenomen. Verdichte gronden bevatten minder water bij lage vochtspanning en meer water bij hoge vochtspanning, wat vooral voor grof-korrelige gronden geldt. Hysteresis in grof-korrelige gronden neemt door de verdichting af omdat de poriëngrootteverdeling meer uniform wordt. Door verdichting

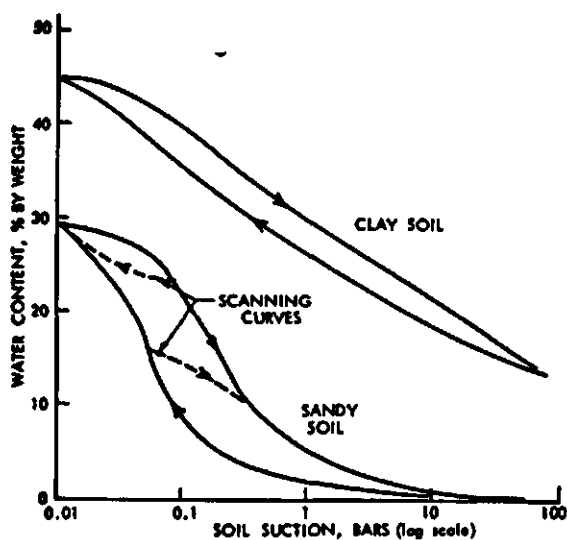


Fig. 2.29. Waterretentiecurves voor twee gronden met verschillende korrelgrootteverdelingen (WARKENTIN, 1971)

wordt de hoeveelheid beschikbaar water voor de planten, zowel voor klei- als zandgronden vergroot (fig. 2.30). De grotere hoeveelheden beschikbaar water voor de plant hoeven geen extra plantgroei op te leveren, omdat de hoeveelheid zuurstof dan de beperkende factor voor de plantengroei kan worden.

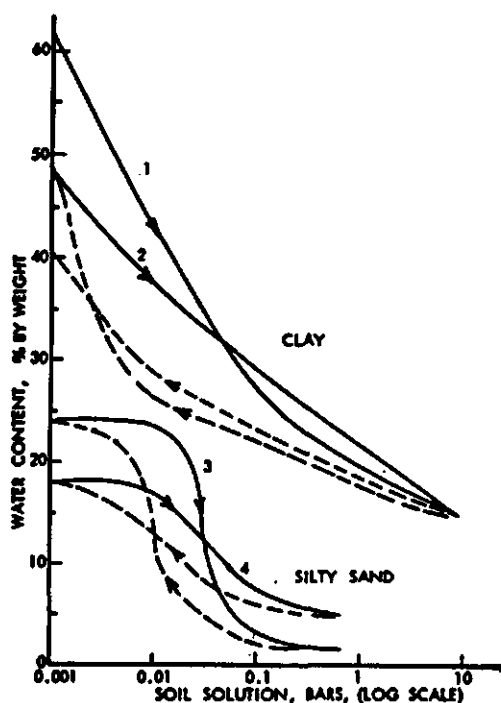


Fig. 2.30. Effect van verdichting op waterretentiecurves, (1) en (3) bij lage en (2) en (4) bij hoge dichtheid (WARKENTIN, 1971)

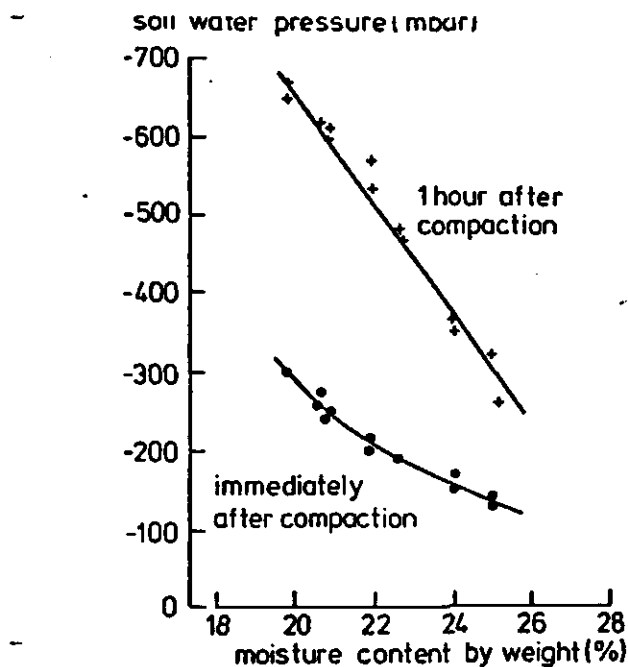


Fig. 2.31. Tijdseffect van de vochtspanning na verdichting in Wageningse siltige klei (VAN WIJK, 1984)

Bij de verdichting van de grond speelt ook de tijdsfactor een belangrijke rol. Onmiddellijk na de verdichting is het bodemwater chaotisch verdeeld en zal er een herverdeling plaatsvinden in het grondprofiel. Dit houdt een vorm van watertransport op microschaal in, hetgeen tijd kost. Daarom zal de vochtspanning na de verdichting ook variëren, zoals in fig. 2.31 (VAN WIJK, 1984).

2.7. Formules

In het verleden is reeds diverse malen getracht om de indringingsweerstand uit te drukken in de primaire bodemparameters volumieke massa, vochtgehalte, lutumgehalte, cohesie etc.

CHESNESS et al. (1972) vond met behulp van regressieanalyse de volgende vergelijking voor de conusindex van een Faceville sandy loam in een laboratoriumsituatie:

$$CI = 1.305(D)^{0.79} \cdot (BD)^{13.18} \cdot (MC)^{-2.17} \quad r = 0.98$$

als CI = conus index, psi

D = diepte, inch (0 tot 12.0)

BD = volumieke massa, g/cm³ (1.39 tot 1.71)

MC = vochtgehalte, % volumieke massa (4.8 tot 9.3)

De waarden van de exponenten zijn verkregen door middel van proeven in het laboratorium.

Bij het vergelijken van met deze formule gevonden waarden met waarden die in veld gemeten zijn, blijkt de formule veel te lage waarden te geven, namelijk 10 tot 15 maal de gemeten veldwaarden (zie tabel 2.4). Hieruit haalt CHESNESS het bewijs dat verstoorde grondmonsters niet dezelfde sterkte ontwikkelen als ongestoorde monsters.

HORN (1984) gebruikt in zijn formules zeer veel bodemparameters (11 stuks) hetgeen de bruikbaarheid aanzienlijk beperkt (tabel 2.5).

ELBANNA en WITNEY (1984,1987) gebruiken slechts drie bodemparameters,

$$CI = [K_C C_r e^{-n\theta/(1+C_r)} + K_\phi \gamma / (1+2 C_r)] e^{\pi/(1+2 C_r)}$$

als CI = conus index, MPa

C_r = lutumgehalte

γ = volumieke massa, kN/m³

θ = vochtgehalte, gewichtsprocenten

K_C, K_φ = coëfficiënten

n = exponent

Met lineaire regressie werden de waarden van K_C, K_φ en n gevonden.

Tabel 2.4. Vergelijking van de gemeten en de berekende indringsweerstand (PSI) op een diepte van 2.0 inch. (CHESNESS, 1972)

Plot	Under tree		Middles		Trafficked middles	
	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured
Byron						
Disced	6.90	106.19	23.44	82.33	5.24	144.78
Herbicide	27.62	201.37	23.55	332.53	35.58	349.47

Tabel 2.5. Berekende vergelijking tussen de indringingsweerstand en bodemparameters voor verschillende grondsoorten (HORN, 1984)

Table 1. Calculated correlation between the penetration resistance (y) ($\times 10^3$ Pa) and soil parameters.

d_B = bulk density ($g\ cm^{-3}$)
 T = clay (%)
 U = silt (%)
 $o. S.$ = organic matter (%)
 LK = air capacity (%)
 $n\ WK$ = available water capacity (%)
 TW = non plant available water (%)
 c = cohesion ($N\ cm^{-2}$)
 P_v = preconsolidation load ($N\ cm^{-2}$)
 $CaCO_3$ = calcium carbonate (%)
 pF = log. desiccation rate (—)

1. $Ton \leq 20\ %$

$$y = 22,3823 d_B - 0,2315 T - 0,0021 U + 2,285 o. S. + 10,19 pF - 0,3228 LK - 8,2 n\ WK^{-1} - 9,7166 TW^{-1} - 37,2113$$

$$r^2 = 0,87 \quad F = 45,52^{***}$$

$$b) \ y = 31,44 d_B - 0,28 T - 0,0112 U + 2,74 o. S. + 12,126 pF - 0,1428 LK + 0,4704 C + 0,4218 TW - 71,75$$

$$r^2 = 0,86 \quad F = 34,88^{***}$$

2. $Ton: 20 - 45\ %$

$$y = 131,38 - 18,144 d_B + 0,1497 T - 0,6324 U - 1,8578 o. S. + 3,532 pF - 0,676 LK - 1,1107 n\ WK - 1,9084 TW + 0,371 P_v$$

$$r^2 = 0,99 \quad F = 55,69^{***}$$

3) $Ton \geq 20\ %$

$$a) \ y = 173,46 - 43,23 d_B - 0,0253 Exp. (T \times 0,1) - 0,012 Exp. (U \times 0,1) - 14919 o. S. + 0,5716 pF - 1,0513 LK - 1,7587 n\ WK - 2,3323 TW$$

$$r^2 = 0,93 \quad F = 26,55^{***}$$

$$b) \ y = 179,73 - 39,354 d_B - 0,1779 T - 0,7539 U - 2,397 o. S. + 5,42 pF + 1,4675 CaCO_3 - 0,9847 LK - 1,2517 n\ WK - 1,7502 TW$$

$$r^2 = 0,97^{***}$$

3. BESCHRIJVING VAN DE GEBRUIKTE PENETROMETER

De penetrometer die in dit onderzoek gebruikt is, is een "Bush recording soil penetrometer" (fig. 3.1). Het hart van dit apparaat is een krachtdoos die de uitgeoefende kracht doorgeeft aan een registratiekastje. Deze krachtdoos werkt volgens het electromechanisch principe. Onder deze krachtdoos zit de conusstang met daaronder de conus. De conusstang steekt door een gat in de bodemplaat, die aan de geleidestang vast zit. De dieptemeting vindt plaats doordat een metalen strip met gaatjes, die aan de geleidestang bevestigd zit, een foto-electrische cel passeert. Bij iedere passage geeft de meetcel de diepte en de daarbij behorende kracht door aan het registratiekastje. Na iedere sondering kunnen de indringingsweerstand afzonderlijk afgelezen en opgeschreven worden, of aan een portable computer, die op de penetrometer bevestigd zit, doorgeseind worden.

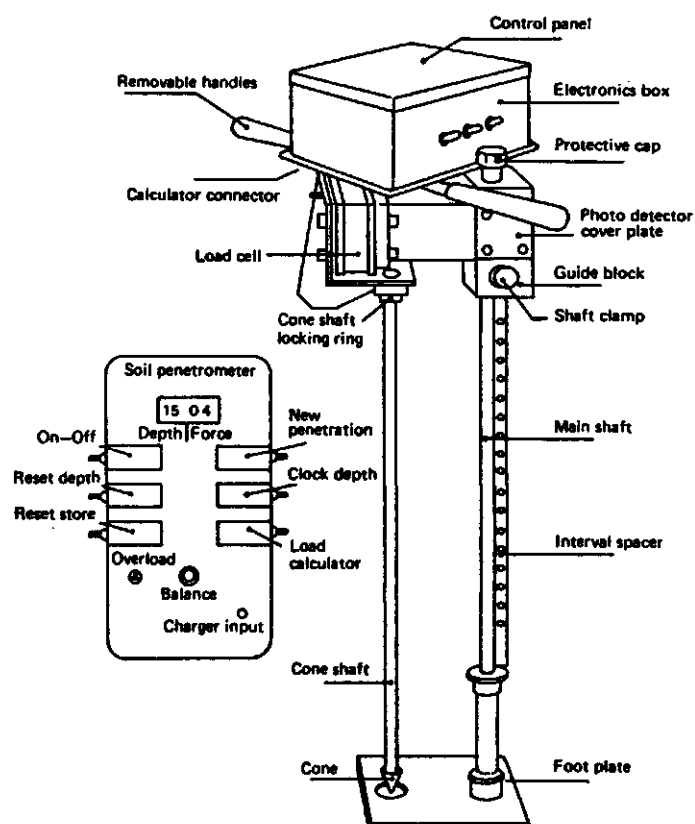


Fig. 3.1. De "Bush" penetrometer

De totale sonderingsdiepte kan gevarieerd worden door verschillende geleidestangen te gebruiken. De diepteintervallen zijn te varieren door aan de geleidestang een andere strip te monteren met een andere afstand tussen de gaatjes. Per sondering kunnen maximaal 15 waarnemingen worden gedaan.

De gebruikte portable computer is een Epson HX-20 die na iedere serie sonderingen de gegevens op een cassettebandje opslaat en meteen de gemiddelden en de standaardafwijking van de meetwaarden geeft en een plot tekent. Door deze plot is meteen inzicht en controle op de meetgegevens mogelijk, zie fig. 3.2.

```

TAPECOUNTER:      266
DATE:             87/07/03
TIME:             14:06:11
PROJECTNO:WE2.1
LOCATION:-15
PLOT:1.0
CONE:C 60deg, 1.0cm
CONSTANT-INTERVAL: 5.0cm
PENETRATIONS:      7

```

depth(cm)	SD	mean(N)
0.0	7.7	35
5.0	42.5	207
10.0	43.8	233
15.0	32.4	209
20.0	16.9	191
25.0	18.8	186
30.0	20.0	227
35.0	50.5	283
40.0	41.0	313
45.0	25.0	345
50.0	30.2	364
55.0	24.7	334
60.0	29.4	299
65.0	22.6	289
70.0	41.1	277

```

TAPECOUNTER:      394

```

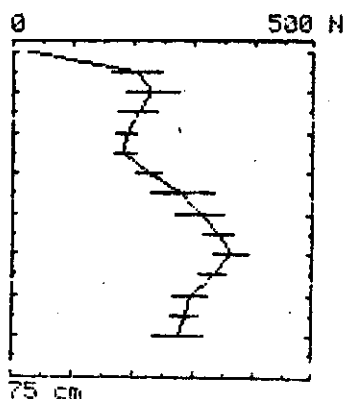


Fig. 3.2. Voorbeeld van controlestrook uit de Epson

4. UITVOERING VAN DE PROEVENSERIE

4.1. Manier van vullen van de proefbak

De proefbak, die 4 m lang, 60 cm breed en 50 cm hoog is, is verdeeld in twee compartimenten van elk 1.40 m lang. De compartimenten zijn 1.40 m lang, omdat er anders niet genoeg grond was om de bak tot de rand toe te vullen. Ieder compartiment is met een andere dichtheid gevuld. Gekozen is voor de dichtheden 1.5 g/cm^3 (1500 kg/m^3) en 1.6 g/cm^3 , omdat in de praktijk blijkt dat bij een dichtheid van 1.5 g/cm^3 nog geen problemen met de bewortelbaarheid ontstaan, terwijl bij een droge volumieke massa van 1.6 g/cm^3 de grond duidelijk niet meer goed doorwortelbaar is.

Voordat met het vullen van de bak kan worden begonnen, wordt de grond op het juiste vochtgehalte gebracht. Er zijn drie vochtgehalten gekozen, namelijk 8, 11 en 14 gewichtsprocenten vocht. Deze keuze is gedaan omdat bij deze vochtgehalten al triaxiaalproeven zijn uitgevoerd. Het op het juiste vochtgehalte van de grond brengen gebeurt door tijdens het doorspitten van de grond kleine hoeveelheden water toe te voegen, zodat het water gelijkmatig wordt verdeeld. Tot het moment waarop de grond in de proefbak wordt gedaan, wordt de verdamping zoveel mogelijk beperkt.

Bij het vullen van de bak is bij de grond met een vochtgehalte van 8% gebruik gemaakt van een metalen raamwerk van 50 bij 30 bij 5 cm met een wanddikte van 2 mm. Dit is in de proefbak gelegd en gevuld met de uitgerekende hoeveelheid grond en met een stamper samengedrukt tot de juiste dichtheid. De droge volumieke massa wordt in het vervolg van dit verslag dichtheid genoemd. Bij het verwijderen van het raamwerk ontstaat ruimte tussen de samengedrukte grond en de wand van de bak, wat tot gevolg heeft dat de dichtheid niet constant is, maar aan de rand van het verwijderde raamwerk lager is. In het midden van zo'n grondblok is de dichtheid hoger. De proefbak is volgens het schema dat in figuur 4.1 is afgebeeld, gevuld. Daarom ontstaat in het midden van de bak een strook met een andere dichtheid. Deze is met aparte ringmonsters gemeten.

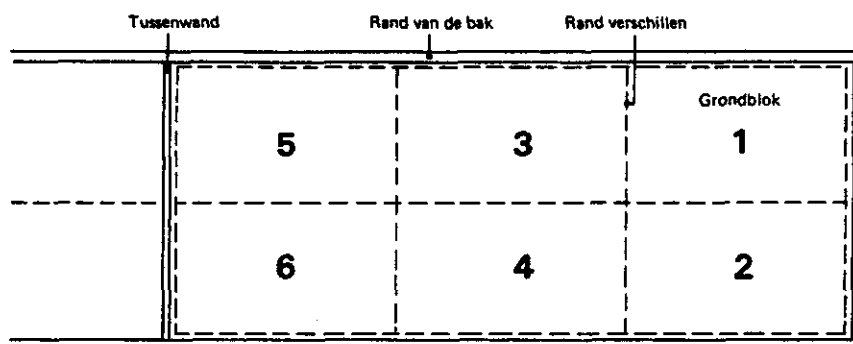


Fig. 4.1. Wijze van vullen van de proefbak

De proefbak is in lagen van 5 cm gevuld. De overgangen, die tussen de verschillende lagen kunnen voorkomen, zijn zoveel mogelijk verwijderd, door iedere keer het bovenste laagje los te maken.

Omdat bij het vullen van de bak door het raamwerk te gebruiken grote verschillen in de dichtheid zijn ontstaan, is voor de grond met vochtgehalten van 11% en 14% een ander systeem gekozen. Er is een balkje tussen de zijkanten van de bak geklemd, waardoor de lage dichtheden aan de rand en in het midden worden voorkomen.

Elke keer na het vullen van de bak zijn in ieder compartiment tensiometers geplaatst. De tensiometers zijn steeds op de dieptes 10, 20, 30 en 40 cm horizontaal aangebracht. Omdat de tensiometers nogal storingsgevoelig zijn, zijn er op elke diepte steeds twee geplaatst, om de controle op storingen en fouten groter te maken. De gevonden vochtspanningen zijn in een waterretentiecurve uitgezet.

Om het verschil tussen de conussen aan te tonen, zijn er per dichtheid en vochtgehalte twintig sonderingen met iedere conus uitgevoerd. Omdat de afstand tussen de sonderingen op 12 cm is gesteld (zie paragraaf 5.1) kunnen er in de breedterichting precies vijf penetraties op een rij worden uitgevoerd. Dit houdt in dat er acht rijen van 12 cm breedte nodig zijn in ieder compartiment om alle penetraties uit te voeren. Van de beschikbare ruimte in het compartiment is ongeveer 25 cm nodig om de tensiometers te plaatsen, zodat er 15 tot 20 cm over blijft om de ringmonsters te nemen. Er zijn per laag van 7 cm 7 ringmonsters van 100 cm^3 in de breedterichting van de bak genomen. Bij de

plaatsbepaling is speciaal rekening gehouden met dichtheidsverschillen aan de rand en in het midden van de bak.

Het vochtgehalte is bepaald bij de uitwerking van de ringmonsters en met aparte vochtmonsters die met een guts tussen de penetraties genomen zijn.

4.2. Uitvoering van het veldonderzoek

In het veld zijn dezelfde metingen verricht als in het laboratorium. Het perceel waarop de metingen zijn verricht is het zelfde als waar de grond die in het laboratorium gebruikt is, is afgegraven. Dit is gedaan om verschillen in korrelsamenstelling te vermijden.

Bij de eerste veldwaarnemingen zijn twee profielkuilen gegraven waarbij met behulp van ringmonsters de dichtheden zijn bepaald. Tevens zijn de tensiometers tot een diepte van 80 cm geplaatst. In de buurt van de profielkuilen zijn de penetraties uitgevoerd.

In de loop van het groeiseizoen zijn drie keer penetraties uitgevoerd tot een diepte van 70 cm.

5. RESULTATEN EN ANALYSE

5.1. Proevenserie modelproefbak

De proeven zijn in de proefbak zijn uitgevoerd met een zeer fijne sterk leemhoudende zandgrond, zoals die in Westerhoven aangetroffen is. De grond bevat 1.6% organische stof en geen aantoonbare hoeveelheid CaCO_3 .

De korrelgrootteverdeling van de grond is als volgt:

2.65% lutum, 15.15% silt, 46.87% fijn zand (50-150 μm), 34.83% grof zand (150-2000 μm) en 0.5% grind.

Van de 15 beschikbare waarden bij iedere sondering, zijn er 8 gebruikt bij de verdere uitwerking. De 6 bovenste meetwaarden zijn niet gebruikt omdat daar nog geen volledig ontwikkeld bezwijkpatroon is bij de sondering en de onderste waarde is buiten beschouwing gelaten omdat daar de invloed van de bodem te groot is. Het vaststellen van deze grenzen is in overeenstemming met de in paragraaf 2.3.3 gevonden afstanden. Hieruit is gesteld dat de diepte waarop een meting uitgevoerd is niet van invloed is op de uiteindelijke Iw-waarde.

De Iw-waarden staan in kgf vermeld omdat de penetrometer in kgf registreert, waarbij 1 kgf overeenkomt met 9.81 N. Het delen van de indringingsweerstand door het oppervlak van de basisdoorsnede van de conus zou de conusindex (CI) leveren, een in de praktijk veel gebruikte waarde. Deze conusindex geeft echter alleen maar verwarring, omdat het de indruk wekt dat de conusindexen van verschillende conussen met elkaar mogen worden vergeleken. Uit de literatuur blijkt dat dit tot zeer grote fouten leidt. Ook geeft het gebruik van de CI de indruk dat met een penetrometer drukken worden gemeten, wat absoluut niet het geval is. Met een penetrometer wordt de kracht gemeten, die nodig is om een conus met een bepaalde doorsnede en tophoek de grond in te duwen. Bij een indringingsweerstand moet dan ook altijd de soort conus worden vermeld. In dit verslag wordt de Iw daarom in krachteenheden uitgedrukt.

5.1.1. Invloed van de wand

De nabijheid van de wand heeft op de indringingsweerstand geen duidelijke invloed. Bij een aantal sonderingen uitgevoerd op 3, 6 en 14 cm van de wand blijken de Iw's allemaal ten opzichte van het totale gemiddelde slechts weinig af te wijken. Dit is aangegeven in tabel 5.1. De gegeven indringingswaarden zijn van een bodemprofiel dat aanwezig was in de proefbak, voor de eigenlijke proevenserie werd begonnen. Met Metingen waarbij de afstand tussen de sonderingen werd gevarieerd, bleken geen significante verschillen op te leveren.

Omdat de verschillen niet significant groot zijn, is bij het verdere onderzoek de afstand tussen de sonderingen 12 cm en de afstand tot de wand 6 cm genomen. Deze waarde komt overeen met de in de literatuur vermelde cijfers (Farrel en Greacen, 1966) van 5 maal de diameter van de conus.

Tabel 5.1. Bepaling van de invloed van de wand

diepte (cm)	gemiddelde Iw (kgf)	SD (kgf)	% verschil SD/gem Iw	wandafstand					
				3 cm		6 cm		14 cm	
				Iw	SD	Iw	SD	Iw	SD
21.0	15.0	2.3	15.3	13.8	1.8	16.7	3.1	15.5	2.0
24.5	24.5	3.7	15.1	25.0	3.9	25.9	3.8	24.1	3.4
28.0	27.9	4.1	14.7	28.6	4.6	27.4	2.7	28.4	3.4
31.5	28.2	4.3	15.2	28.1	5.4	26.6	2.7	29.1	4.0
35.0	30.7	4.2	13.7	28.7	4.9	29.3	2.6	31.8	5.3
38.5	33.4	3.0	9.0	33.3	3.1	31.9	3.1	35.0	2.6
42.0	29.5	3.1	10.5	30.6	2.1	28.9	4.4	29.0	3.3
45.5	28.5	3.7	13.0	28.1	1.5	28.0	5.0	27.9	5.1

5.1.2. Meetresultaten

De proevenserie in de bak zijn bij drie verschillende vochtgehalten, namelijk 8, 11 en 14 gewichtsprocent vocht uitgevoerd.

In de proefbak zijn bij het vochtgehalte van ongeveer 8 % in totaal 40 sonderingen uitgevoerd. Bij het uitwerken van die metingen is gebleken dat er op bepaalde plaatsen in het horizontale vlak grote verschillen in Iw voorkwamen. Dit is veroorzaakt door de manier van vullen van de bak, zoals aangegeven in paragraaf 4.1. Daarom zijn de Iw-gegevens in drie groepen onderverdeeld, namelijk metingen aan de rand van de bak, in het midden van de bak en metingen die op de scheidingslijn in de lengterichting van de bak liggen, zie figuur 5.1. Deze onderverdeling geldt voor beide compartimenten. Bij het vaststellen van deze groepen heeft als criterium gegolden dat de standaardafwijking kleiner moest zijn dan 20% van de gemiddelde Iw in die groep. Bij iedere groep zijn afzonderlijke ringmonsters genomen om de dichtheid van de grond te bepalen.

Na de sondering zijn ook het vochtgehalte (θ) en de vochtspanning (h) gemeten.

Omdat bij het vochtgehalte van 11% de bak op een andere manier gevuld is, zijn de dichtheidsverschillen aan de rand en op de scheidingslijn niet meer aanwezig. Daarom is de verdeling in groepen, zoals die bij het vochtgehalte van 8% gebruikt zijn, niet meer nodig. Maar omdat er nog steeds grote verschillen in Iw voorkomen, is een onderverdeling nog steeds op zijn plaats. De verschillen in Iw worden nu door de invloed van het tussen de zijwanden geklemde balkje veroorzaakt.

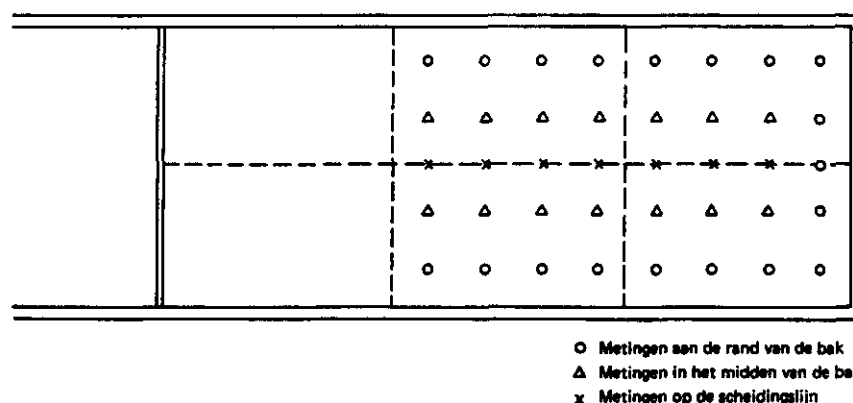


Fig. 5.1. Plaatsen waar de verschillende groepen metingen zijn genomen

Doordat de proefbak nog steeds in blokken van 35 cm lengte, 50 cm breedte en 5 cm hoogte wordt gevuld, ontstaan bij het invullen van de bak nog steeds overgangsverschillen tussen de verschillende blokken grond. Als een blok grond met een stamper wordt verdicht, blijkt een gedeelte van het tevoren ingevulde blok ook nog extra verdicht te worden. Daardoor ontstaat in de laatste rij metingen van het eerste blok hogere Iw's, terwijl in de eerste rij metingen van het laatste blok lagere Iw's worden gemeten. Per blok wordt een rij met te hoge, een rij met te lage en een rij met gemiddelde Iw's gemeten. De groepen worden nu los, gemiddeld en vast genoemd. Van iedere groep zijn apart de dichtheden gemeten.

Bij het vochtgehalte van 14% is maar 1 compartiment gevuld, omdat bij de metingen gebleken is dat bij hoge dichtheden reeds een kleine Iw optreedt. Om tijd te besparen is daarna de bak niet meer met de lage dichtheid gevuld.

De verschillen in Iw zijn door het zorgvuldig vullen van de proefbak bij deze serie minder groot, zodat er slechts een onderverdeling in twee groepen, namelijk los en vast, nodig is geweest. Deze onderverdeling is voldoende om de SD kleiner dan de gestelde norm van 20% van de gemiddelde waarde te krijgen.

De meetgegevens staan vermeld in bijlage 1.

5.1.3 Vergelijking conussen

Een van de doelstellingen van het onderzoek is het vergelijken van de Nederlandse conus met een tophoek van 60° en een oppervlak van 1.0 cm^2 en de ASAE(B)-conus met een tophoek van 30° en een oppervlak van 1.3 cm^2 .

Voor elke conus zijn de dichtheid en de Iw bij de drie vochtgehalten tegen elkaar uitgezet. Uit deze reeksen punten wordt met behulp van de kleinste kwadraten methode de meest ideale rechte lijn berekend. Hiervan is tevens de correlatiecoëfficiënt bepaald. Met behulp van een plotter worden de verschillende lijnen getekend. In fig. 5.2 staan de berekende rechte lijnen afgebeeld. De bijbehorende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten staan in tabel 5.2.

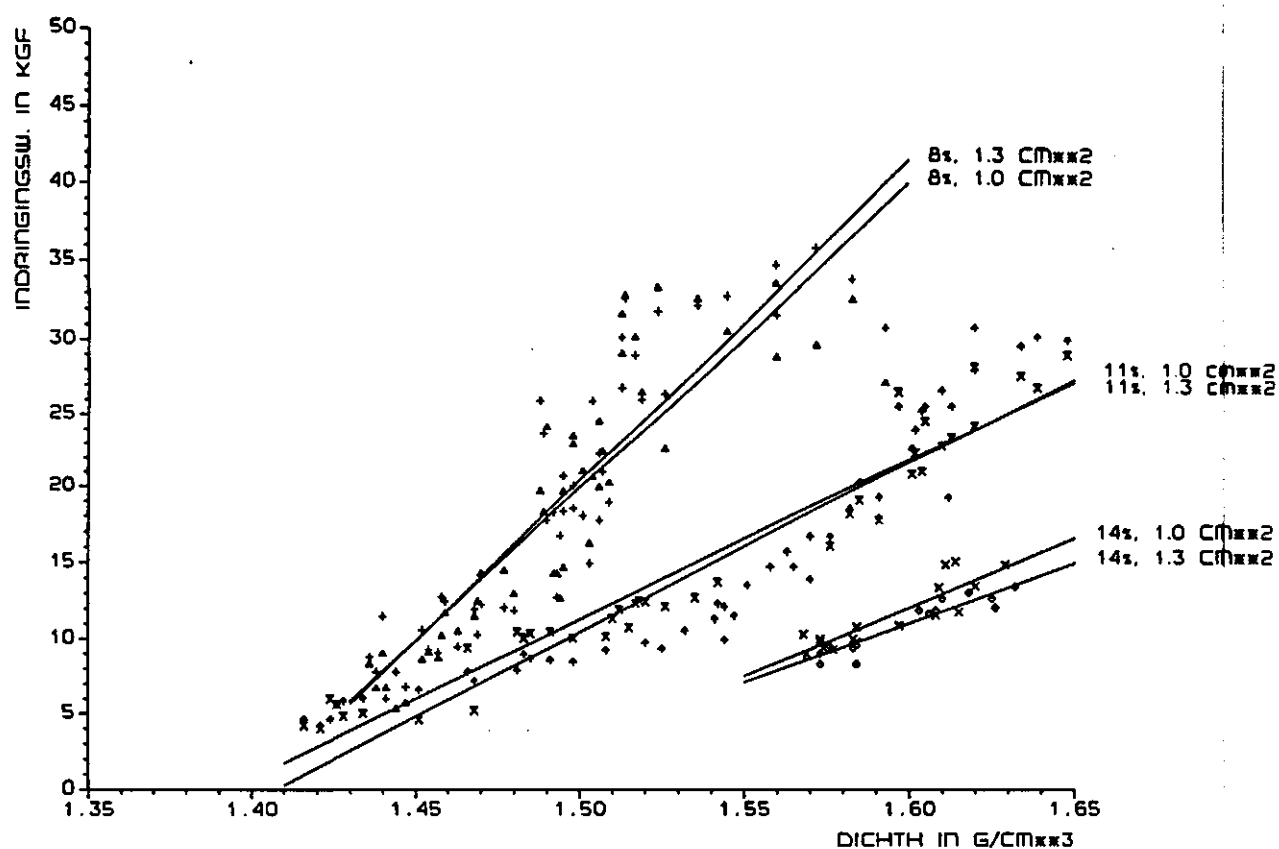


Fig. 5.2. Relatie Iw - dichtheid voor verschillende conussen bij verschillende vochtgehalten

Tabel 5.2. Berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten van de relatie Iw - dichtheid voor verschillende conussen bij verschillende vochtgehalten

	conus	aantal punten	vergelijking	correlatie- coëfficiënt
8.0	1.0	48	$Y = 202.7 X - 284.0$	$r = 0.8785$
	1.3	48	$Y = 212.8 X - 298.6$	$r = 0.9054$
11.0	1.0	48	$Y = 113.5 X - 159.8$	$r = 0.9254$
	1.3	40	$Y = 106.7 X - 148.7$	$r = 0.9689$
14.0	1.0	16	$Y = 91.8 X - 134.7$	$r = 0.8798$
	1.3	16	$Y = 79.4 X - 116.0$	$r = 0.9398$

Uit de vergelijking van de twee conussen blijkt dat er bij deze grondsoort geen grote verschillen in Iw bestaan, als de dichtheid en het vochtgehalte gelijk zijn. Dit is in overeenstemming met de gegevens van TIJINK en VAANDRAGER (1983), waaruit een omrekeningsfactor van gemiddeld 0.99 kan worden berekend. De 1.3 cm² conus geeft wel iets hogere waarden als de grond droger en dichter is. Bij 14% vocht geeft de 1.0 cm² conus hogere waarden, omdat er dan meer kleef aan de conusstang plaatsvindt. Dit komt omdat de stang voor de 1.0 cm² conus relatief dikker is. Bij de verder uitwerking van de gegevens wordt er geen onderscheid meer tussen de conussen gemaakt, omdat de verschillen in benodigde indringkracht niet significant zijn.

5.1.4. Relatie indringingsweerstand - dichtheid

De samengevoegde gegevens van de 1.0 en 1.3 cm² conus geven fig. 5.3. De vergelijkingen en de correlatiecoëfficiënten staan in tabel 5.3.

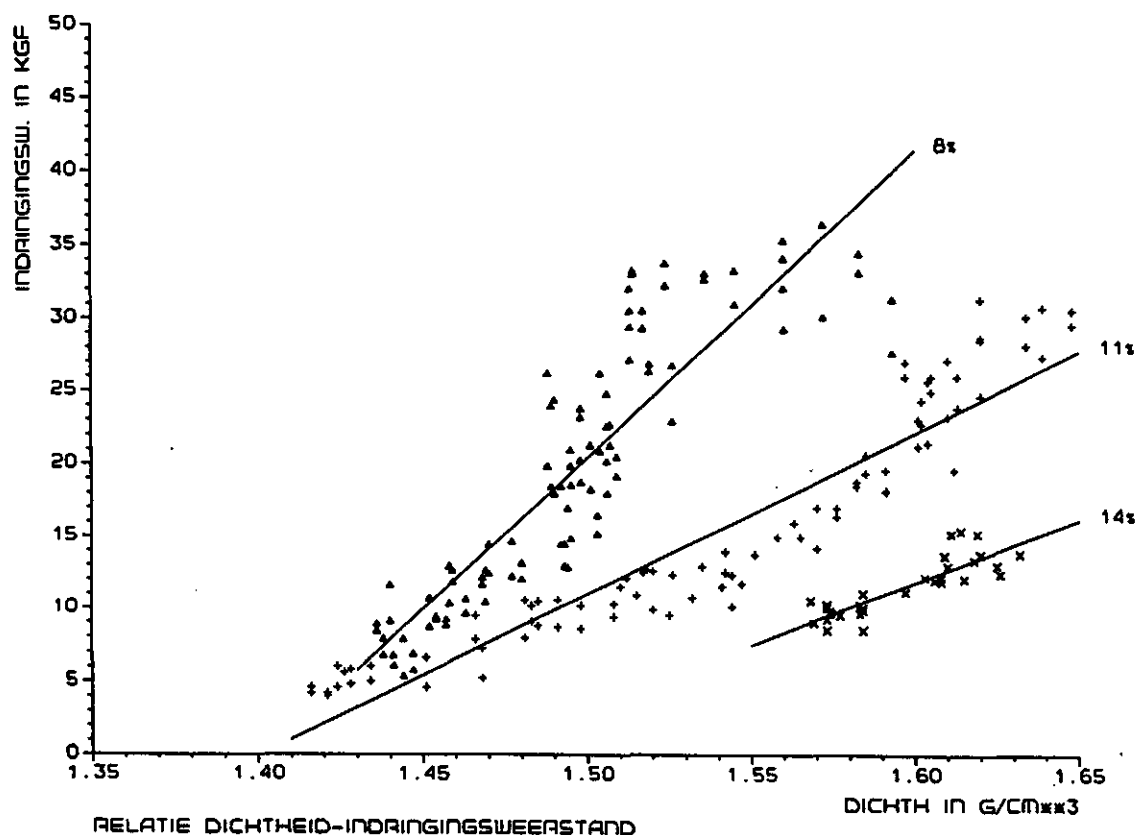


Fig. 5.3. Relatie Iw - dichtheid bij verschillende vochtgehalten

Tabel 5.3. Berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten van de relatie Iw - dichtheid bij verschillende vochtgehalten

	aantal punten	vergelijking	correlatie- coëfficiënt
8.0	96	$Y = 207.7 X - 291.3$	$r = 0.8917$
11.0	88	$Y = 109.9 X - 153.9$	$r = 0.9447$
14.0	32	$Y = 85.0 X - 124.3$	$r = 0.8637$

Fig. 5.3 geeft duidelijk weer dat de Iw bij een lager vochtgehalte aanzienlijk hoger is, bij constante dichtheid.

5.1.5 Relatie indringingsweerstand - vochtgehalte/vochtspanning

Om de verschillen tussen het vochtgehalte en de vochtspanning duidelijker tot uiting te laten komen en hun relatie met de Iw aan te tonen, worden ze apart tegen de Iw uitgezet. Daarbij moet wel de dichtheid constant zijn. Om deze reden zijn de dichtheden in zes groepen ingedeeld met ieder een breedte van 0.04 g/cm^3 .

De voor de verdere analyse gebruikte gegevens zijn bijeengebracht in bijlage 2. Deze gegevens leveren de fig. 5.4 op. Het vochtgehalte en de vochtspanning zijn tegen elkaar uitgezet in fig. 5.5.

De berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten staan in tabel 5.4.

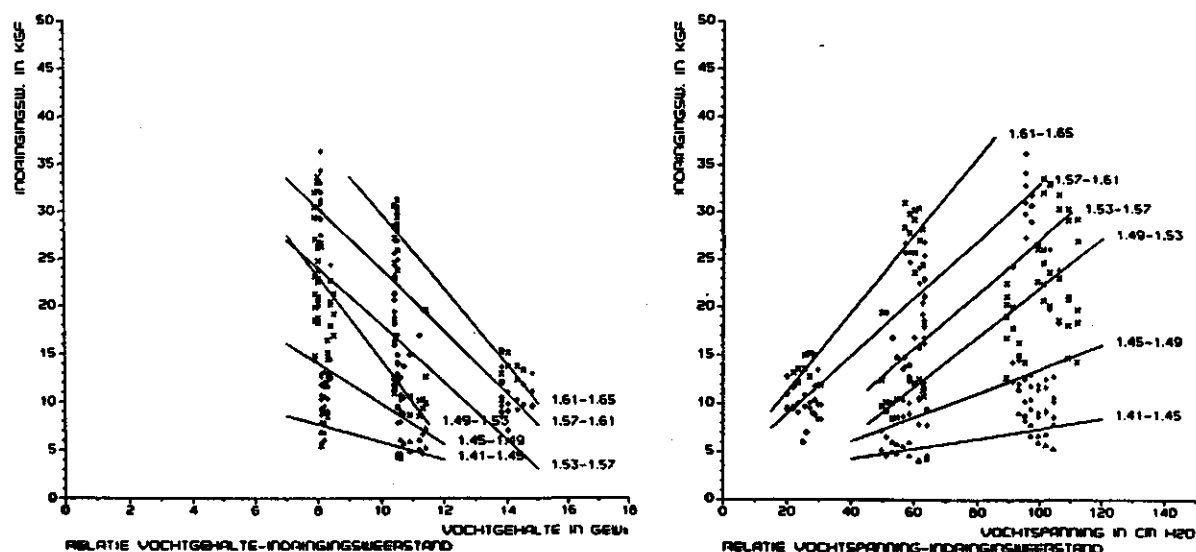


Fig. 5.4. Relaties Iw - vochtgehalte en Iw - vochtspanning voor verschillende groepen dichtheden

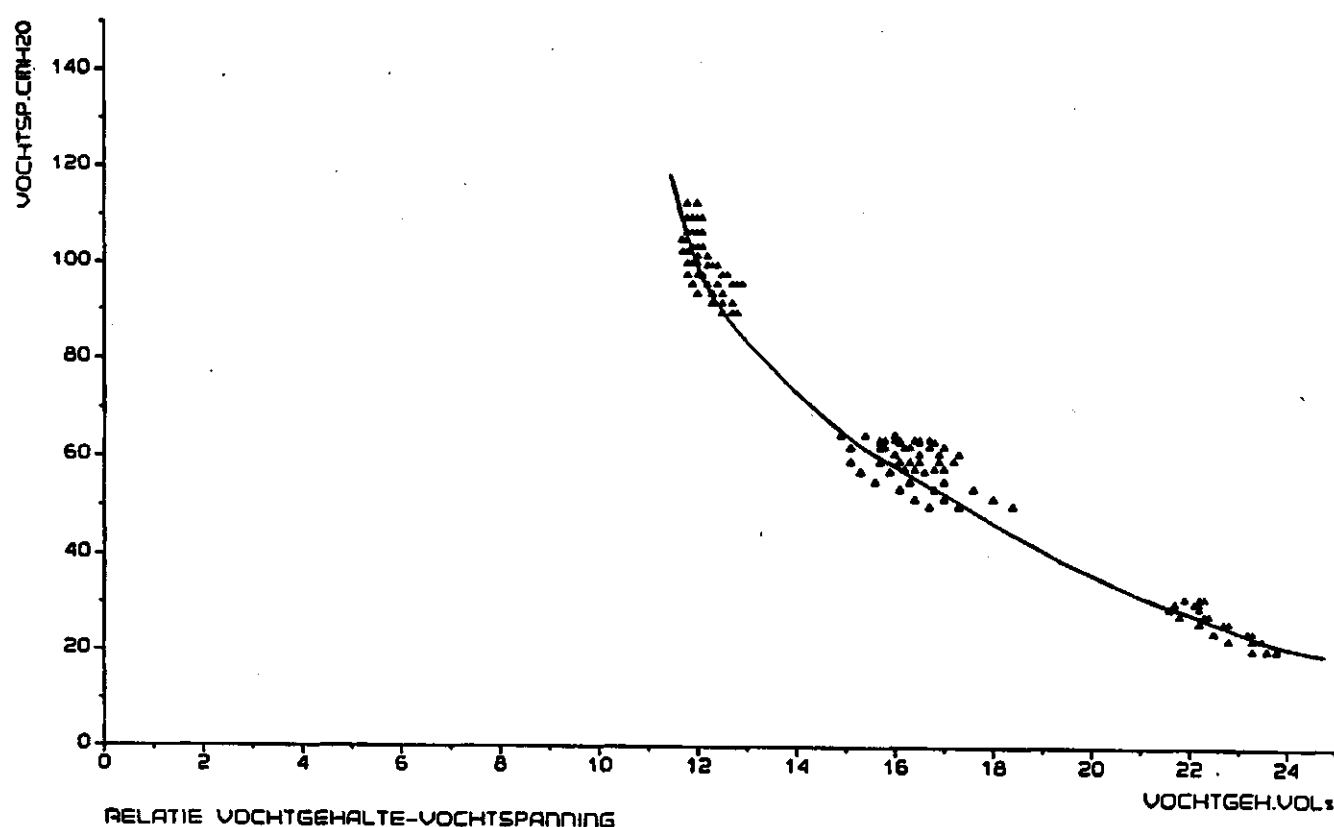


Fig. 5.5. Relatie vochtgehalte - vochtspanning

De lijnen in de fig. 5.4 lijken door de manier van verwerken met de kleinste kwadratenmethode een chaos. Omdat er een grote spreiding tussen de punten zit, hetgeen ook tot uiting komt in de vrij lage correlatiecoëfficiënt, is het niet mogelijk om uit deze lijnen duidelijke conclusies te trekken. De lijnen kunnen slechts gebruikt worden als indicatie. Bij de lijnen zijn de gemeten punten afgedrukt om te beoordelen in hoeverre de getrokken lijnen realistisch zijn.

Omdat de punten uit enkele puntenwolken bestaan, zijn de gemiddelde waarden van de dichtheid, I_w , vochtgehalte en vochtspanning van deze punten wolken bepaald en is er een parabool doorheen getrokken.

Hierdoor is het mogelijk om de lijnen in een regelmatig patroon af te drukken. Dit levert dan fig. 5.6 op.

Tabel 5.4. Berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten van de relaties Iw - vochtgehalte en Iw - vochtspanning voor verschillende groepen dichtheden

Relatie Iw - vochtgehalte				
dichtheid	aantal punten	vergelijking		correlatie-coëfficiënt
1.41-1.45	24	$Y = - 0.908 X + 14.9$		$r = - 0.6551$
1.45-1.49	40	$Y = - 2.080 X + 30.5$		$r = - 0.5403$
1.49-1.53	57	$Y = - 4.373 X + 57.9$		$r = - 0.7453$
1.53-1.57	24	$Y = - 5.015 X + 69.5$		$r = - 0.8632$
1.57-1.61	49	$Y = - 3.235 X + 56.0$		$r = - 0.9260$
1.61-1.65	22	$Y = - 3.957 X + 69.1$		$r = - 0.9540$
Relatie Iw - vochtspanning				
dichtheid	aantal punten	vergelijking		correlatie-coëfficiënt
1.41-1.45	24	$Y = 0.052 X + 2.25$		$r = 0.5961$
1.45-1.49	40	$Y = 0.124 X + 1.19$		$r = 0.5146$
1.49-1.53	57	$Y = 0.258 X - 3.71$		$r = 0.7378$
1.53-1.57	24	$Y = 0.401 X - 8.58$		$r = 0.9218$
1.57-1.61	49	$Y = 0.301 X + 2.94$		$r = 0.9255$
1.61-1.65	22	$Y = 0.410 X + 3.06$		$r = 0.9444$

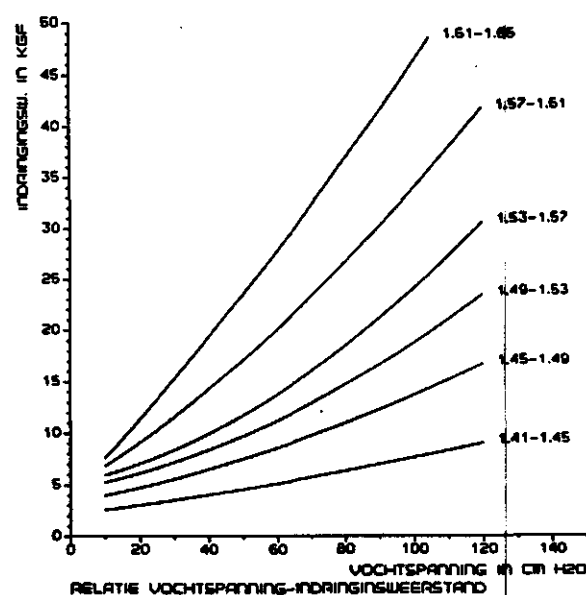
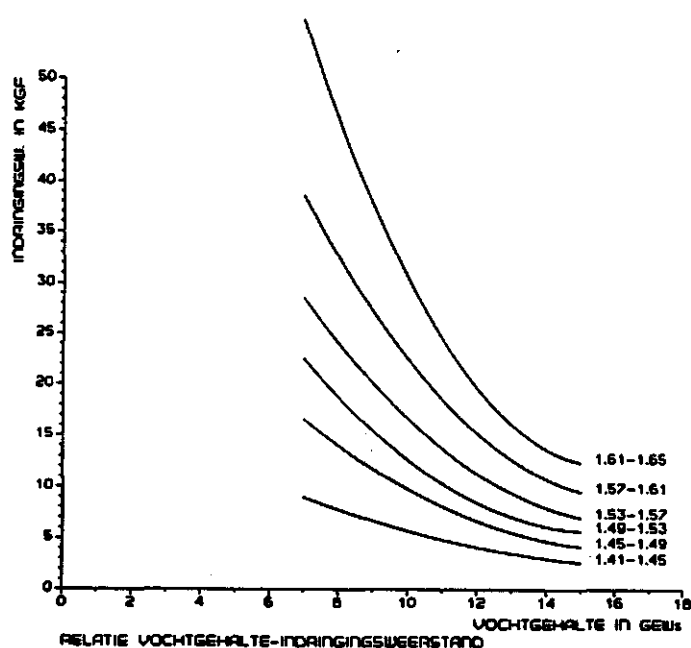


Fig. 5.6. Aangepaste relaties Iw - vochtgehalte en Iw - vochtspanning

5.1.6. Relatie indringingsweerstand - schijnbare cohesie

De Iw gerelateerd aan het vochtgehalte en de vochtspanning levert geen duidelijk beeld op. Daarom is getracht het verband tussen de Iw en een afgeleide grootheid van het vochtgehalte en de vochtspanning, de schijnbare cohesie te bepalen. Deze schijnbare cohesie kan worden benaderd met een formule die gebaseerd is op het werk van TOWNER en CHILDS (1972) namelijk $C' = (0.3 + 0.7 * S) * h$

waarin C' = schijnbare cohesie, in cm H₂O

S = verzadigingsgraad

h = vochtspanning, in cm H₂O

Als criterium voor het gebruik van deze formule wordt gesteld dat de verzadigingsgraad hoger dan 50% moet zijn. In het geval van een droger wordende grond (desorptie) voldoet de formule tot een verzadigingsgraad van 30%.

S wordt berekend met de formule $S = (\text{vol\%}) / n$, terwijl n wordt berekend met:

$$n = \left(1 - \frac{\gamma}{(1 - \alpha) * 2.65 + \alpha * 1.47} \right)$$

waarin n = poriëngehalte

α = org. stofgehalte

γ = dichtheid, in g/cm³

De meetgegevens staan in bijlage 2 en leveren fig. 5.7 op. De berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten staan in tabel 5.5. Uit figuur 5.7 blijkt dat de Iw uitgezet tegen de schijnbare cohesie een vrijwel identiek beeld oplevert als de relatie Iw - vochtspanning. Dit komt omdat door de gebruikte formule de schijnbare cohesie een zeer hoge correlatiecoëfficiënt met de vochtspanning oplevert.

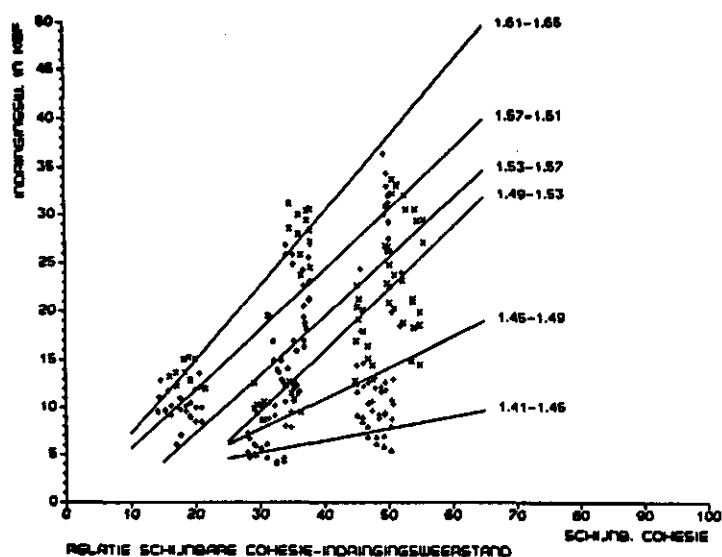


Fig. 5.7. Relatie Iw - schijnbare cohesie bij verschillende groepen dichtheden

Tabel 5.5. Berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten voor de relatie Iw - schijnbare cohesie

dichtheid	aantal punten	vergelijking	correlatie-coëfficiënt Iw / C'	correlatie-coëfficiënt C' / h
1.41-1.45	24	$Y = 0.123 X + 1.5$	$r = 0.5847$	$r = 0.9997$
1.45-1.49	40	$Y = 0.318 X - 1.9$	$r = 0.5393$	$r = 0.9990$
1.49-1.53	57	$Y = 0.63 X - 9.4$	$r = 0.7486$	$r = 0.9990$
1.53-1.57	24	$Y = 0.60 X - 4.8$	$r = 0.8845$	$r = 0.9976$
1.57-1.61	49	$Y = 0.62 X - 0.5$	$r = 0.9212$	$r = 0.9954$
1.61-1.65	22	$Y = 0.76 X - 0.4$	$r = 0.9438$	$r = 0.9993$

5.2. Proevenserie Westerhoven

Om de proevenserie in de proefbak op zijn betrouwbaarheid te kunnen controleren, zijn in het groeizeizoen in 1987 een serie metingen in Westerhoven op het PAGV-808 proefveld verricht. Bij deze serie zijn dezelfde bodemparameters gemeten als in de proefbak.

Het profiel bestaat uit een donkere bouwvoor met een dikte variërend

van 30 tot 38 cm. Hierin zit 3 % organische stof. Onder de bouwvoor komt een lichter gekleurde C-horizont voor met een organisch stofgehalte van 1.6%. De korrelgrootteverdeling varieert in het profiel nauwelijks, en is als volgt: 3% lutum, 16% silt, 46% fijn zand en 35% grof zand.

Op 25 en 27 mei zijn de tensiometers geplaatst, ringmonsters genomen en de eerste sonderingen uitgevoerd. Hieruit bleek dat de verdichte laag vrij diep in het profiel voorkwam, zodat de sonderingen tot 70 cm diepte moesten worden uitgevoerd.

De metingen die bij de verdere analyse zijn gebruikt, zijn verricht op 3 juni, 2 en 3 juli en 14 juli.

5.2.1. Meetresultaten

De gemeten waarden voor de Iw, de dichtheid, het vochtgehalte en de vochtspanning staan in bijlage 3.

Opvallend is de sterke variatie van de Iw op 40 tot 45 cm diepte, zie figuur 5.8. De variatie in gemeten dichtheden is op die diepte niet zo groot, maar varieert wel in hetzelfde patroon. De hoogst gemeten dichtheid komt op een diepte van 50 tot 55 cm voor, terwijl een ploeg-zool op een diepte van 30 tot 35 cm normaal is. Dit leidt tot de stelling dat het profiel een keer gewoeld is tot een diepte van ongeveer 50 cm. Bij navraag bleek dit zo te zijn. Dit verklaart dan ook de ongelijke dikte van de bouwvoor.

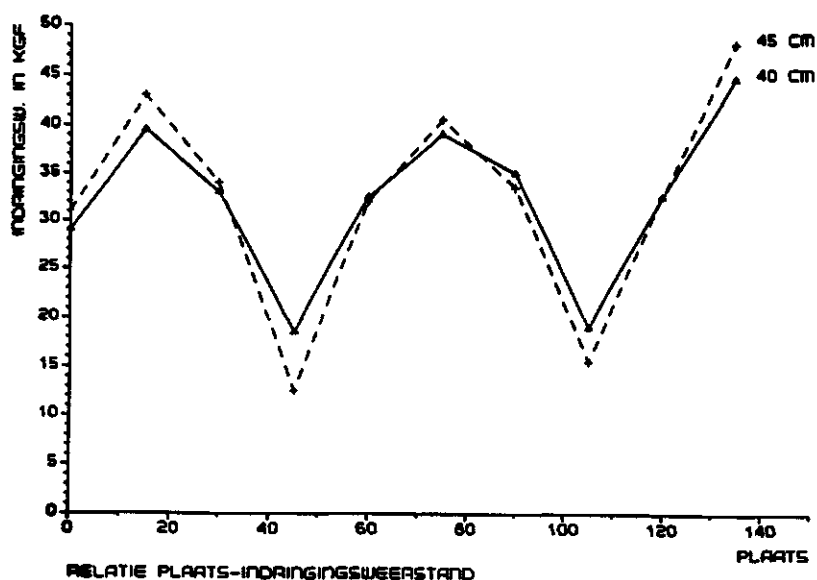


Fig. 5.8. Variatie in Iw op 40 - 45 cm diepte in Westerhoven

Om de stelling van het woelen te controleren is er nog een keer een profielkuil gegraven, waarbij de dichtheden tot 80 cm diepte in 3 rijen met een onderlinge horizontale afstand van 15 cm is bepaald. In het verlengde van deze rijen zijn de Iw-metingen gedaan. De Iw varieert even sterk en in hetzelfde patroon als bij de eerste metingen, zodat ook hier nauwkeurig is terug te vinden waar gewoeld is. Ook met de ringmonsters is gemeten op welke plaatsen gewoeld is, echter de variatie in de meetwaarden is veel geringer. De geringere variatie in de dichtheid wordt verklaard door het relatief grote oppervlak van een ringmonster, namelijk 20 cm^2 , ten opzichte van een conus met een oppervlak van 1.0 of 1.3 cm^2 . Grote verschillen in dichtheden worden door de penetrometer exact geregistreerd, terwijl dit bij de ringmonsters veel meer genivelleerd wordt. Ook is er plaatselijk, op een diepte van 30 tot 45 cm, een stagnatie van de wortelgroei geconstateerd, hetgeen leidt tot horizontale wortelgroei. Omdat deze ploegzool niet overal voorkomt zijn er tot 70 cm diepte nog wortels van de wintergerst aangetroffen. Dit alles leidt tot een grote spreiding van de gemeten waarden.

5.2.2. Relatie indringingsweerstand - dichtheid

De meetwaarden die in bijlage 4 staan zijn geselecteerd op vochtgehalte en ingedeeld in vier groepen, namelijk 3.5-6.5 %, 6.5-9.5 %, 9.5-12.5% en 12.5-16.5%. Deze grenzen zijn zo gekozen omdat ze het best overeen komen met de groepen zoals die bij het proefbak-onderzoek gebruikt zijn, namelijk 8, 11 en 14% vocht.

Als voor deze groepen de Iw tegen de dichtheid wordt uitgezet levert dit het beeld van fig. 5.9 op. De berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten staan in tabel 5.6.

Uit figuur 5.9 blijkt dat een lager vochtgehalte in een hogere Iw resulteert. Opmerkelijk is wel het geringe verschil tussen de lijnen van 6.5-9.5% en 9.5-12.5% vocht. Blijkbaar is er in het vochttraject van 6.5 tot 12.5% weinig verschil in Iw bij een gelijke dichtheid.

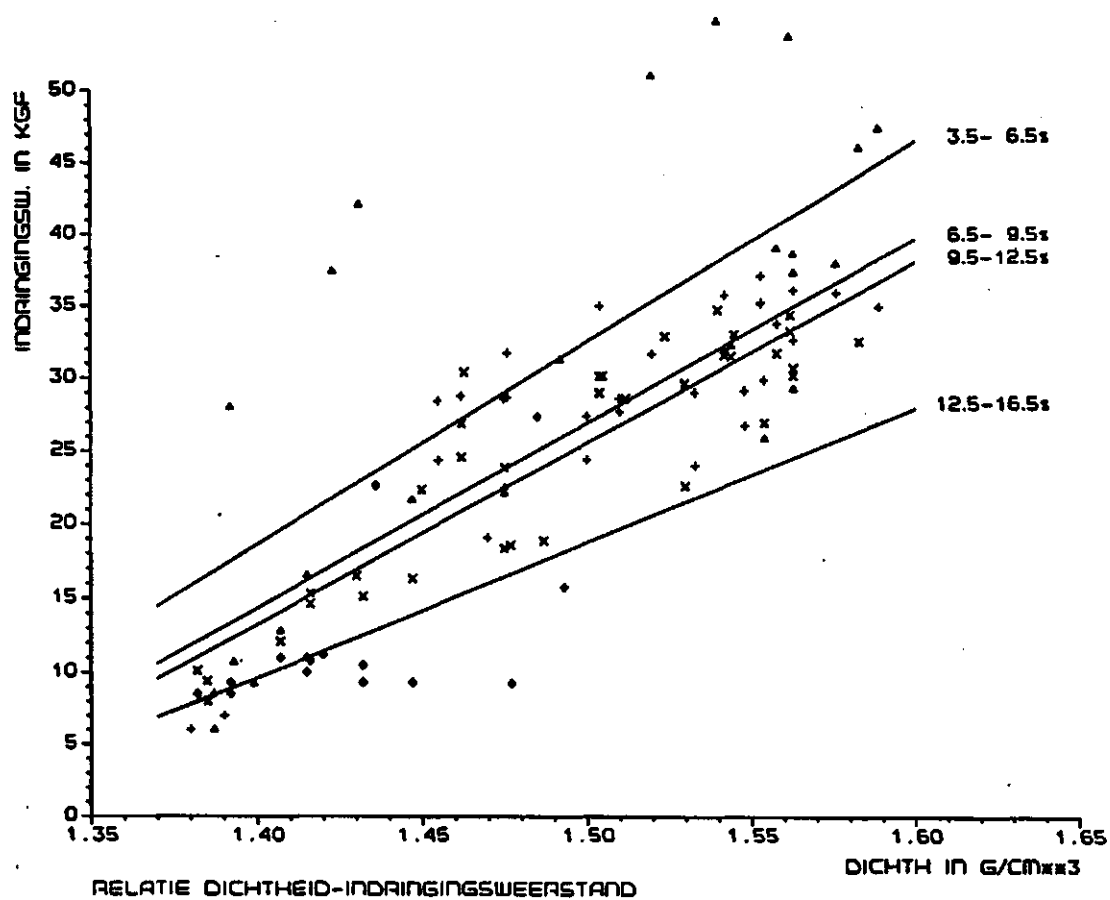


Fig. 5.9. Relatie Iw - dichtheid bij verschillende vochtgehalten in het veld

Tabel 5.6. Berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten van de relatie Iw - dichtheid bij verschillende vochtgehalten in het veld

	aantal punten	vergelijking	correlatie- coëfficiënt
3.5- 6.5	23	$Y = 137.5 X - 173.9$	$r = 0.7150$
6.5- 9.5	34	$Y = 124.8 X - 160.3$	$r = 0.8531$
9.5-12.5	35	$Y = 122.2 X - 157.8$	$r = 0.8990$
12.5-16.5	15	$Y = 90.7 X - 117.4$	$r = 0.5575$

5.2.3. Relatie indringingsweerstand - vochtgehalte / vochtspanning / schijnbare cohesie

Om de relaties I_w - vochtgehalte, I_w - vochtspanning en I_w - schijnbare cohesie te bepalen zijn de meetgegevens weer in groepen met een ongeveer gelijke dichtheid ingedeeld. De indeling is dezelfde als die bij het proefbakonderzoek gebruikt is, om een vergelijking hiermee mogelijk te maken. De voor de verdere analyse gebruikte meetgegevens staan in bijlage 5. Met de kleinste kwadratenmethode leveren deze meetwaarden fig. 5.10 op.

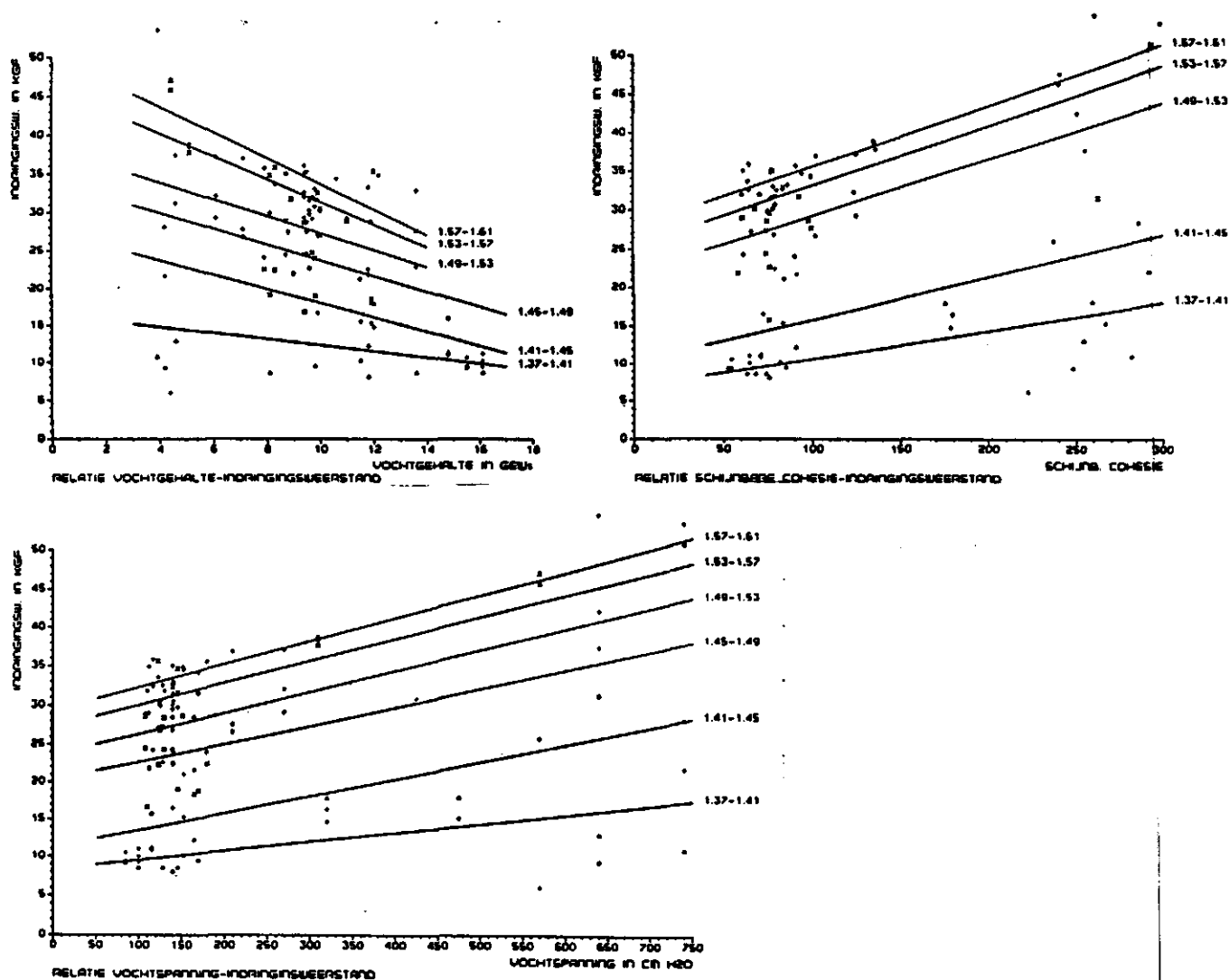


Fig. 5.10. Relaties I_w - vochtgehalte, I_w - vochtspanning en I_w - schijnbare cohesie bij verschillende groepen dichtheden in het veld

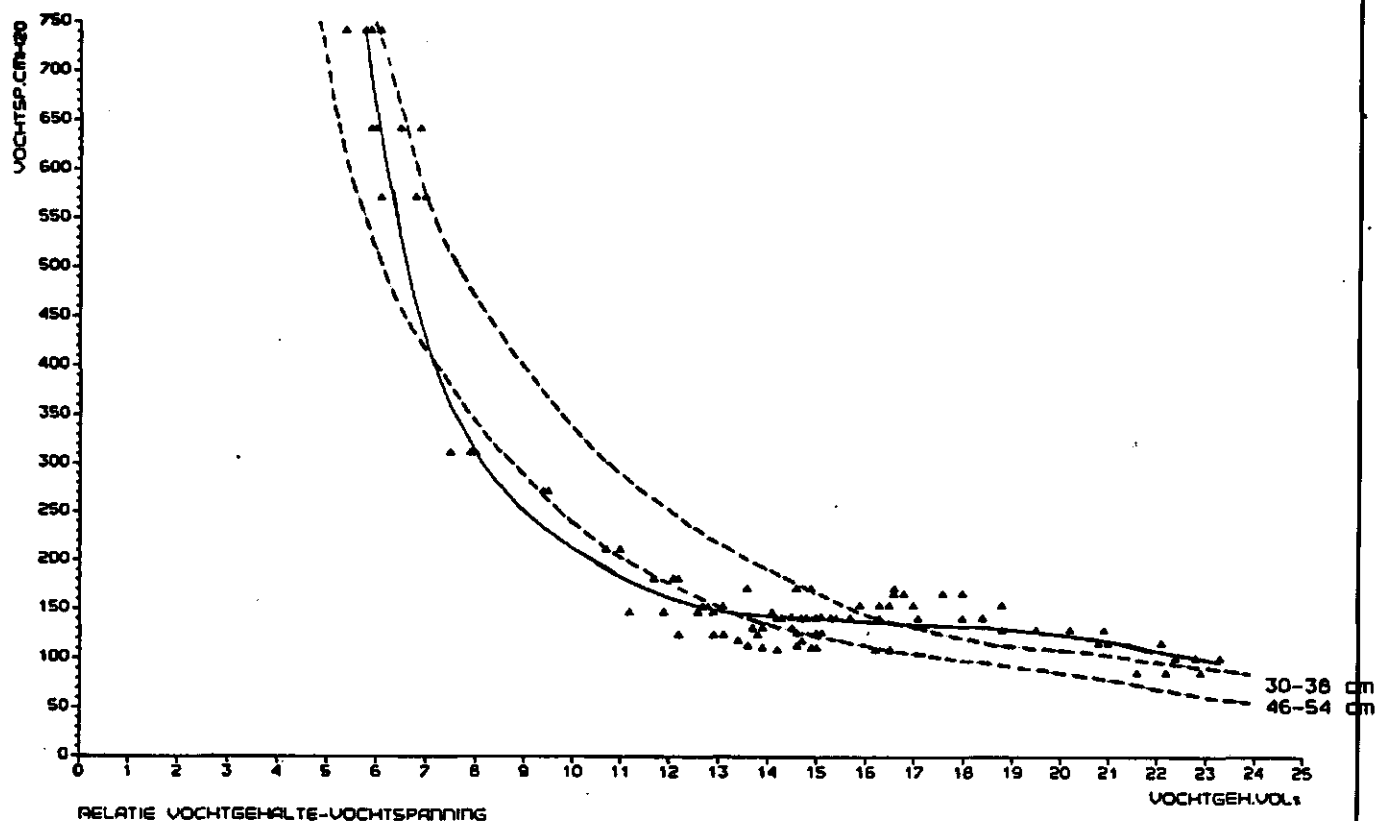


Fig. 5.11. Relatie vochtspanning - vochtgehalte in het veld en in het laboratorium

De vochtspanning uitgezet tegen het vochtgehalte is te zien in fig. 5.11. Deze lijn komt redelijk overeen met de in het laboratorium bepaalde pF-curves bij een dichtheid van 1.52 g/cm^3 op 30-38 cm diepte en een dichtheid van 1.51 g/cm^3 op 46-54 cm diepte. De dichtheid van de pF-curve in figuur 5.11 varieert van 1.38 tot 1.59 g/cm^3 . De bijbehorende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten staan in tabel 5.7.

De lijnen in fig. 5.10 leveren een vrij regelmatig patroon op, waarbij wel vermeld moet worden dat de correlatiecoëfficiënt laag is.

Bij de relatie I_w - schijnbare cohesie is de lijn met een dichtheid van 1.45 - 1.49 g/cm^3 niet afgedrukt omdat de lijn een negatieve richtingscoëfficiënt heeft en de correlatiecoëfficiënt zeer laag is. Bij de relatie I_w - vochtspanning is deze correlatiecoëfficiënt ook zeer laag maar die lijn past in het beeld van de andere lijnen in die figuur. Opvallend is weer de hoge correlatiecoëfficiënt tussen de schijnbare cohesie en de vochtspanning.

Tabel 5.7. Berekende vergelijkingen en correlatiecoëfficiënten van de relatie I_w - vochtgehalte, I_w - vochtspanning en I_w - schijnbare cohesie voor verschillende groepen dichtheden in het veld

Relatie Iw - vochtgehalte			
dichtheid	aantal punten	vergelijking	correlatie-coëfficiënt
1.37-1.41	15	Y = - 0.42 X + 16.4	r = - 0.3335
1.41-1.45	19	Y = - 0.97 X + 27.5	r = - 0.5165
1.45-1.49	17	Y = - 1.05 X + 34.1	r = - 0.3707
1.49-1.53	15	Y = - 1.12 X + 38.3	r = - 0.5234
1.53-1.57	34	Y = - 1.50 X + 46.1	r = - 0.5140
1.57-1.61	8	Y = - 1.68 X + 50.3	r = - 0.7977

Relatie Iw - vochtspanning			
dichtheid	aantal punten	vergelijking	correlatie-coefficient
1.37-1.41	15	Y = 0.0192 X + 8.3	r = 0.5632
1.41-1.45	20	Y = 0.0226 X + 11.3	r = 0.5428
1.45-1.49	17	Y = 0.0233 X + 20.3	r = 0.1020
1.49-1.53	17	Y = 0.0265 X + 23.7	r = 0.6796
1.53-1.57	35	Y = 0.0280 X + 27.2	r = 0.6574
1.57-1.61	7	Y = 0.0295 X + 29.3	r = 0.9660

Relatie Iw - schijnbare cohesie				
dichtheid	aantal punten	vergelijking	correlatie-coefficient Iw / C'	correlatie-coefficient C' / h
1.37-1.41	15	Y = 0.0359 X + 6.9	r = 0.6254	r = 0.9786
1.41-1.45	20	Y = 0.0537 X + 10.3	r = 0.4909	r = 0.9750
1.45-1.49	17	Y = -0.0104 X + 24.1	r = -0.0223	r = 0.9020
1.49-1.53	17	Y = 0.0707 X + 22.0	r = 0.6687	r = 0.9971
1.53-1.57	35	Y = 0.0752 X + 25.4	r = 0.6595	r = 0.9961
1.57-1.61	7	Y = 0.0763 X + 27.7	r = 0.9593	r = 0.9991

5.3. Vergelijking proefbakonderzoek - veldonderzoek

Bij vergelijking van de resultaten in de proefbak en in het veld, is de geringe samenhang opvallend. Dit blijkt uit de fig. 5.12. Vooral de discrepantie bij de relatie I_w - vochtspanning is duidelijk. Het blijkt dat bij dezelfde vochtgehalten en dichtheden de vochtspanning in de bak aanzienlijk lager is dan in het veld. Anders uitgedrukt; bij dezelfde vochtspanning is de grond in het veld natter. De schijnbare cohesie is in het veld daardoor hoger dan in de proefbak. Hierdoor is in het veld een hogere I_w gemeten bij dezelfde dichtheid en hetzelfde vochtgehalte. Gedeeltelijk is dit te verklaren door hysteresis. In de proefbak zijn de metingen verricht terwijl de grond steeds natter gemaakt is, dus is de absorptietak van de pF-curve bepaald. In het veld is de grond door de evapotranspiratie steeds meer uitgedroogd en is de meer gebruikelijke desorptietak bepaald en bij de verdere uitwerking gebruikt. De pF-curve die in het laboratorium bepaald is, is ook een desorptiecurve, en komt redelijk overeen met de eigen bepaalde curve uit het veld. Het verschil tussen de ab- en de desorptielijn is de hysteresis.

Een aanvullende verklaring van de hogere I_w in het veld is, dat in de loop van de tijd er toch een soort van binding in de grond plaats vindt, die hem sterker maakt. Deze is volgens BAKKER 5 kgf in 2 à 3 jaar. Dit ondanks het feit dat de grond een zandgrond is, waarin weinig of geen structuurelementen voorkomen. De binding kan komen door het cyclische proces van droog en nat worden, waardoor er humus- en leemverplaatsing naar de contactpunten optreedt. Dit verklaart dan ook het feit dat bij zeer hoge vochtspanningen er een zeer harde grond ontstaat, maar als de bindingen eenmaal verstoord zijn er geen enkele samenhang tussen de afzonderlijke zandkorrels meer is.

De vochtverdeling in de grond is in de veldsituatie geheel anders dan in de bak. In het veld hoopt het water zich op in de contactpunten, terwijl in de bak het water door het bevochtigen nog chaotisch verdeeld zit.

Bij het vullen van de bak is door het intensieve mengen bij het bevochtigen van de grond alle aanwezige structuur verloren gegaan.

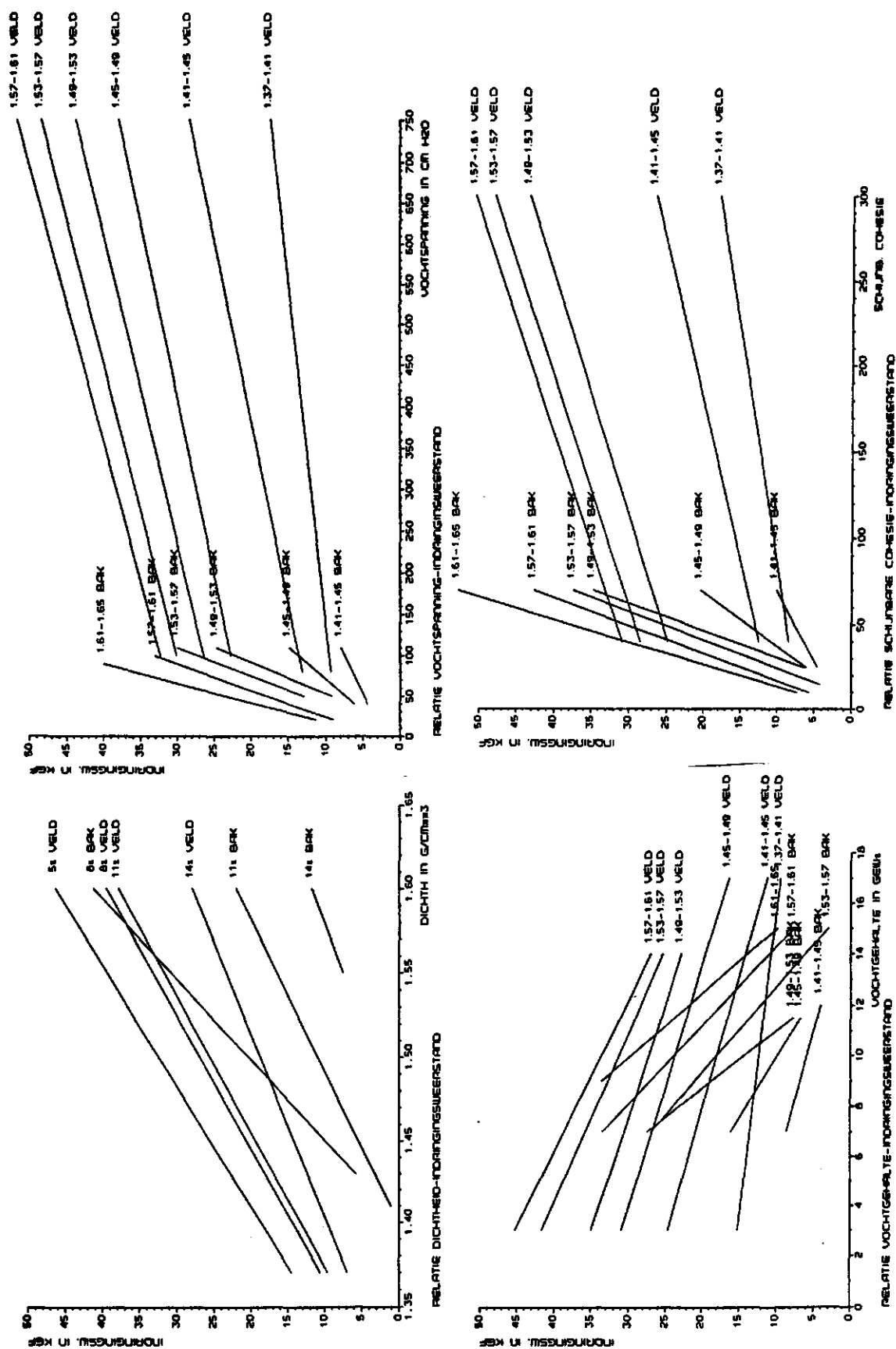


Fig. 5.12 Vergelijking figuren proefbakonderzoek - veldonderzoek

In het veld is het profiel tot grote diepte beworteld, waarbij de wortels voor een grotere Iw kunnen zorgen, doordat ze als een soort wapening als in gewapend beton optreden.

De vervorming die in de buurt van de conus optreedt, heeft invloed op de vochtspanning. Verdichting vindt alleen plaats als de grond nog niet dicht is. Als de grond wel dicht is, moet de grond eerst losser worden, om de korrels over elkaar te laten schuiven. Door de verdichting neemt de hoeveelheid poriën af, waardoor het vochtgehalte in vol% stijgt. Hierdoor en ook door de beweging van de gronddeeltjes daalt de vochtspanning. Bij dichte grond echter neemt het poriëngehalte in eerste instantie toe, omdat de grond eerst losser moet worden. Het vochtgehalte zal daardoor eerst dalen en de vochtspanning toenemen. Vervolgens zal de grond verdichten met de bijbehorende gevolgen voor de vochtspanning en het vochtgehalte. In welke mate vochtgehalte en vochtspanning rond de conus veranderen is niet bekend en (voorlopig) niet te meten of te berekenen.

Bij het vullen van de bak ontstaat door het verdichten een vrij uniform poriënstelsel. De pF-curve krijgt dan de vorm van een stoel, wat wil zeggen dat bij een klein verschil in vochtspanning een grote verandering in het vochtgehalte optreedt. In het veld is door de bodemfauna een veel gevarieerder poriënstelsel ontstaan, waarin meer grote en kleine poriën dan in de proefbak voorkomen. De pF-curve krijgt dan een veel geleidelijker verloop. Wat de invloed van het verschil in poriëngrootteverdeling in de bak en in de veldsituatie op de Iw is, is niet geheel duidelijk.

5.4. Bruikbaarheid formules

In 2.7 zijn drie formules, waarmee de Iw berekend kan worden, besproken. De formule van CHESNESS geeft te lage waarden, ongeveer 10 tot 15 maal lager dan de gemeten waarde. CHESNESS wijdt dit aan het verschil in gedrag van de grond in de laboratoriumsituatie en de veldsituatie.

De formule van HORN is niet met gegevens uit dit onderzoek doorgerekend, omdat een aantal benodigde bodemparameters niet zijn bepaald. Het grote aantal benodigde parameters beperkt de bruikbaarheid zeer. Deze formule is bovendien opgesteld voor een zeer kleine conus.

De hoeveelheid parameters die in de formule van ELBANNA en WITNEY gebruikt worden, is kleiner. Zij ontwikkelden de volgende formule:

$$CI = [K_C C_R e^{-n\theta/(1+C_R)} + K_\phi \gamma / (1+2 C_R)] e^{\pi/(1+2 C_R)}$$

als CI = conus index, MPa

C_R = kleigehalte

γ = volumegewicht, kN/m³

θ = vochtgehalte, gew %

K_C, K_ϕ = coëfficiënten

n = exponent

Voor K_C en K_ϕ zijn de waarden van een loamy sand (3.19 en 0.00863) en het gemiddelde van alle in dat onderzoek gebruikte grondsoorten (3.62 en 0.00663) genomen. De exponent n is op 0.1 gesteld, terwijl als C_R 0.03 genomen is omdat de grond 3% lutum bevat. De uiteindelijke waarden van de CI gelden voor de ASAE(A)-conus. Daarom dienen deze getallen met 0.76 vermenigvuldigd te worden om ze voor de ASAE(B)-conus te laten gelden. De berekende lijnen zijn te zien in fig. 5.13.

Uit fig. 5.13 blijkt dat de richtingscoëfficiënt van de berekende lijnen te laag is. Verder liggen de lijnen van de verschillende vochtgehalten veel te dicht bij elkaar en worden voor lage dichtheden veel te hoge I_w 's berekend.

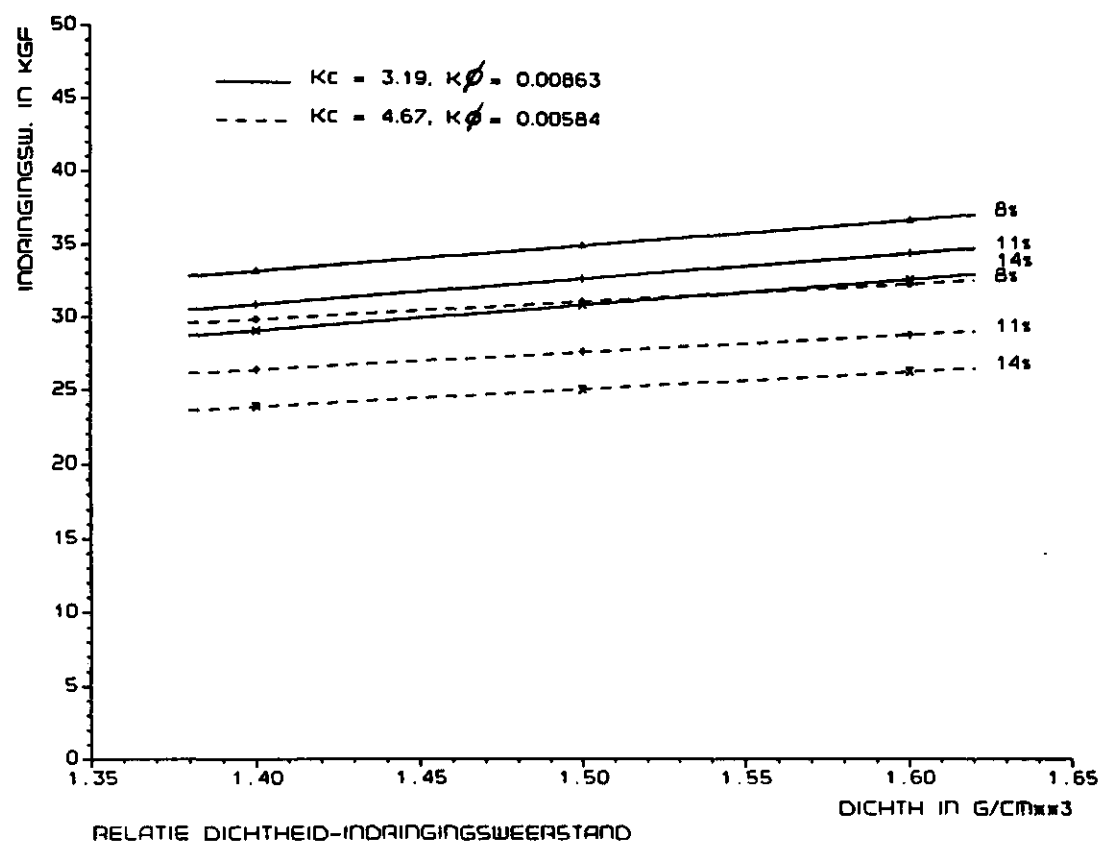


Fig. 5.13. Relatie Iw - dichtheid berekend met de formule van ELBANNA en WITNEY

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1. Conclusies

Uit de resultaten van het onderzoek kunnen een aantal conclusies getrokken worden. Deze zijn:

- Uit de literatuurstudie blijkt dat met een penetrometer de indringingsweerstand I_w wordt bepaald. Dit wil zeggen de kracht die nodig is om een conus met een bepaalde tophoek en doorsnede de grond in te duwen. Het gebruik in de praktijk om deze indringingsweerstand te delen door het oppervlak van de basis van de conus, om zo te komen tot de conusindex (CI), levert geen nieuwe informatie en leidt tot verwarring. Hierdoor wordt namelijk de indruk gewekt dat met de penetrometer drukken worden gemeten, terwijl dit zeker niet het geval is. Bovendien wekt het de indruk dat CI's van verschillende conussen met elkaar kunnen worden vergeleken. Ook dit is niet waar.
- Het verschil tussen meetwaarden van de twee onderzochte conussen, de Nederlandse conus met een tophoek van 60° en een oppervlak van 1.0 cm^2 en de Amerikaanse ASAE(B)-conus met een tophoek van 30° en een oppervlak van 1.3 cm^2 , is bij de onderzochte grond zeer gering. Tijdens de proeven bleek dat bij de Nederlandse conus al bij deze zandgrond kleef aan de sondeerstang optrad. Dit was wel bij het vochtigste profiel en de kleef bleef beperkt. Bij zwaardere gronden kan deze kleef problemen opleveren. Daarom kan worden geconcludeerd dat om deze reden de voorkeur aan de Amerikaanse conus moet worden gegeven.
- Door het nauwkeurige, maar tijdrovende werk in de modelproefbak, worden hoge correlatiecoëfficiënten bereikt. Dit duidt erop dat de nauwkeurigheid van de penetrometer hoog is. In dezelfde situatie geeft de penetrometer dezelfde indringingsweerstand. De spreiding in de resultaten bij een meetserie in het veld kunnen daarom geheel aan de spreiding in het veld worden toegeschreven.
- De inhomogeniteit van het profiel in de diepte en in het horizontale vlak in de veldsituatie zorgt voor een lage correlatie, omdat de bodemparameters niet op precies dezelfde plaats te meten zijn.

- Het verband tussen de resultaten uit de proefbak en uit het veld zijn niet eenduidig. Dit heeft verschillende oorzaken. Ten eerste heeft de grond in de bak door hysteresisverschijnselen niet de juiste vochtspanning en ten tweede heeft de grond in de bak door het vele mengen van de grond een andere sterkte omdat de structuur geheel verdwenen is. Dit heeft tot gevolg dat in het veld bij verder gelijke omstandigheden een duidelijk hogere I_w wordt gemeten dan in de bak.
- Uit het onderzoek volgt dat van de gemeten bodemparameters de dichtheid de duidelijkste relatie heeft met de I_w . Van de andere gemeten parameters blijkt de vochtspanning een duidelijkere relatie te hebben met de I_w dan het vochtgehalte. Dit is onder andere het gevolg van het hysteresisverschijnsel. Het meten van de vochtspanning zal bij grote aantallen metingen echter problemen opleveren. Het berekenen van de schijnbare cohesie levert weinig extra informatie op, omdat de schijnbare cohesie een zeer hoge correlatiecoëfficiënt met de vochtspanning heeft.
- Van deze grond is nog geen nauwkeurige schatting te maken van de dichtheid als de I_w , de vochtspanning en het vochtgehalte bekend zijn. Dit komt omdat de correlatiecoëfficiënten te laag en de standaardafwijkingen te hoog zijn.
- De uit de literatuur gehaalde formules om de I_w te berekenen blijken voor deze grondsoort niet te voldoen.

6.2. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Voor verder onderzoek blijft het proefbakonderzoek van belang. Dit is vanwege de nauwkeurige resultaten die bij deze metingen behaald zijn, ondanks het feit dat de resultaten moeilijk vergelijkbaar zijn met de veldsituatie. Daarom dient er bij verder onderzoek aan de volgende punten aandacht besteed te worden:

- Na het invullen van de bak is het water chaotisch tussen de korrels verdeeld. Het is de vraag hoe zich de sterkte van de grond ontwikkelt als de bak gevuld is en een maand blijft staan. Het is mogelijk dat dan de omstandigheden meer met de veldsituatie overeen komen.

- Door de proefbak op een andere manier te vullen kan er misschien een meer uniforme dichtheid bereikt worden, en kan de benodigde tijd om de bak te vullen teruggebracht worden.
- Om hysteresisverschijnselen in de bak in te calculeren, moeten de eerste metingen bij een hoog vochtgehalte worden gedaan, waarna een reeks metingen wordt gedaan terwijl de grond steeds verder uitdroogt. Dit komt meer overeen met het groeiseizoen in de veldsituatie.
- Bij de proevenserie in het veld moeten zoveel mogelijk ringmonsters dicht bij de sondeerplekken genomen worden, omdat de dichtheid zowel in het verticale als in het horizontale vlak sterk varieert.
- De relatie van de I_w met de dichtheid, de vochtspanning en het vochtgehalte van andere grondsoorten moet ook worden onderzocht.
- Een meer elementair probleem is dat niet bekend is wat precies met de vochtspanning gebeurt, als een conus de grond ingedrukt wordt. Dit zal sterk afhankelijk zijn van het vochtgehalte en de initiële dichtheid van de grond. In hoeverre dit de conusweerstand beïnvloedt, moet worden onderzocht.

SAMENVATTING

In het kader van een 5-maands afstudeervak Cultuurtechniek is dit onderzoek naar de invloed van de verschillende bodemparameters op de indringingsweerstand (I_w) verricht.

De verdichting, die door de huidige mechanisatie in de ondergrond optreedt, wordt door de penetrometer aangetoond. In de afhankelijkheid van de I_w van verschillende bodemparameters is meer duidelijkheid gebracht. Het onderzoek bestond uit een literatuurstudie en een proevenserie in een proefbak en in het veld, waarna de resultaten met elkaar zijn vergeleken.

Uit het literatuuronderzoek blijkt dat er in het verleden reeds veel onderzoek naar de indringingsweerstand is gedaan. Er zijn vele typen penetrometers ontwikkeld waardoor de resultaten uit de verschillende onderzoeken moeilijk vergelijkbaar zijn. De ontwikkelde theorieën geven een redelijk duidelijk beeld wat er met de gronddeeltjes gebeurt als een conus een grondlichaam binnendringt. De uit de theorieën volgende invloedssfeer rondom de conus verschillen echter nogal. De in de literatuur gegeven formules, waarmee de I_w wordt berekend, geven sterk verschillende waarden. Ook is er een groot verschil tussen de genoemde maximale I_w 's waarbij de grond nog net bewortelbaar is. De in de literatuur vermelde relaties tussen de I_w , de dichtheid, vochtspanning en het vochtgehalte geven een overzichtelijk beeld, alleen is het niet mogelijk om er kwantitatief gezien conclusies uit te trekken.

De proevenserie is gesplitst in een gedeelte in de proefbak en een gedeelte in het veld. De proefbak is drie keer met grond met respectievelijk de vochtgehalten van 8, 11 en 14 gewichtsprocent vocht gevuld. De gebruikte grond is een zeer fijne, sterk lemige zandgrond. In de proefbak zijn de sonderingen uitgevoerd, ringmonsters genomen om de dichtheid te bepalen en de vochtgehaltenes en vochtspanningen bepaald. Deze meetgegevens zijn geanalyseerd, waarna de relaties tussen de verschillende bodemparameters zijn bepaald.

Bij de proevenserie in het veld zijn dezelfde parameters gemeten en dezelfde relaties bepaald. Dit is op het perceel gebeurd, waar de grond voor het proefbakonderzoek is afgegraven.

Uit de vergelijking van de resultaten uit de proefbak en het veld

blijkt dat er grote verschillen bestaan. Door het optreden van hysteresis zijn de pF -curves van de proefbak en het veld verschillend, waardoor bij gelijke dichtheid en gelijk vochtgehalte de vochtspanning in de bak lager is. Hierdoor is ook de I_w in de bak lager. Dit wordt nog versterkt doordat in de bak door het mengen van de grond alle structuur verdwenen is, terwijl die in het veld wel aanwezig is.

Uit het onderzoek volgt dat met het proefbakonderzoek hoge correlatiecoëfficiënten in de relaties tussen de parameters bereikt worden, maar dat de toepasbaarheid van deze relaties in het veld te wensen overlaat.

Van de onderzochte bodemparameters heeft de dichtheid de duidelijkste relatie met de I_w . Ook bestaat er een duidelijke relatie tussen de vochtspanning en de I_w . In verband met het hysteresisverschijnsel is de relatie I_w - vochtspanning sterker dan de relatie I_w - vochtgehalte. Daar staat echter tegenover dat vochtgehalten in de praktijk veel gemakkelijker zijn te meten dan vochtspanningen.

LITERATUUR

- ALLERSMA, H.G.B., 1982. Photoelastic investigation of the stress distribution during penetration. Proc. 2nd. Eur. Symp. on Penetration Testing, Amsterdam, 24-27 may, vol. 2, pp. 411-418.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1969. Soil cone penetrometer. Recommendation ASAE R313 Agricultural Engineering Yearbook, pp. 296-297.
- ANDERSON, G., J.D. PIDGEON, H.B. SPENCER and R. PARKS, 1980. A new hand-held penetrometer for soil studies. J. of Soil Sci. 31, 2, pp. 279-296.
- BAKKER, J.W., 1987. Mondelinge mededeling.
- BARLEY, K.P., D.A. FARREL and E.L. GREACEN, 1965. The influence of soil strength on the penetration of a loam by plant roots. Austr. J. Soil Res. 3, 1, pp. 69-79.
- BEUVING, J., 1981. Invloed van conusafmeting op de penetrometer-weerstand van grond. Cultuurtechnisch Tijdschrift 21, 2, pp. 109-115.
- BOONE, F.R., J. BOUMA and L.A.H. DE SMET, 1978. Effect of soil compaction on potato growth. Neth. J. Agric. Sci. 26, pp. 405-420.
- BUTTERFIELD, R. and K.Z. ANDRAWES, 1972. An investigation of a plane strain continuous penetration problem. Geotechnique 22, 4, pp. 597-617.
- CAMP, C.R. jr. and Z.F. LUND, 1968. Effect of mechanical impedance on cotton root growth. Trans. of the ASAE 11, 2, pp. 188-190.
- CHESNESS, J.L., R.E. EFRAIN and C. COBB jr., 1972. Quantitative description of soil compaction in peach orchards utilizing a portable penetrometer. Trans. of the ASAE 15, 2, pp. 217-219.
- DAM, J.G.C. VAN en J.A. HULSHOF, 1967. De penetrometer als instrument voor onderzoek van de grond naar geschiktheid voor de aspergeteelt. Mededelingen Dir. Tuinbouw 30, 5, pp. 186-190.
- DULK, J. DEN, 1976. De penetrografen ontwikkeld door STIBOKA en de RIJP. Scriptie Cultuurtechniek, Landbouwhogeschool Wageningen, 63 pp.

- ELBANNA, E.B. and B.D. WITNEY, 1987. Cone penetration resistance equation as a function of the clay ratio, soil moisture content and specific weight. *J. of Terramechanics* 24, 1, pp. 41-56.
- FARREL, D.A. and E.L. GREACEN, 1966. Resistance to penetration of fine probes in compressible soil. *Austr. J. Soil Res.* 4, 1, pp. 1-17.
- FINDLEY, IRVINE LIMITED, 1979. Instruction manual for use of Bush recording soil penetrometer, mark I model. 18 pp.
- FREITAG, D.R., 1968. Penetration tests for soil measurements. *Trans. of the ASAE* 11, 6, pp. 750-753.
- GILL, W.R., 1968. Influence of compaction hardening of soil on penetration resistance. *Trans. of the ASAE* 11, 6, pp. 741-745.
- GILL, W.R., 1969. Soil deformation by simple tools. *Trans. of the ASAE* 12, 2, pp. 234-239.
- GREACEN, E.L., D.A. FARREL and B. COCKROFT, 1968. Soil resistance to metal probes and plant roots. *Trans. 9th. Int. Congr. Soil Sci., Adelaide, Australia, vol. 1*, pp. 769-779.
- HIELKEMA, J.U., 1974. Literatuurstudie en onderzoek naar de indringingsweerstand van klei- en zavel gronden. STIBOKA rapport 1200, 34 pp.
- HORN, R., 1984. Die Vorhersage des Eindringwiderstandes von Boden anhand von multiplen Regresionsanalysen. *Z.f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 25, 6, pp. 377-380.
- HOUBEN, J.M.M.TH., 1970. Bewortelingsmogelijkheden in zandprofielen. *De Buffer* 16, 4, pp. 53-58.
- KOOLEN, A.J. en H. KUIPERS, 1983. *Agricultural soil mechanics*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 241 pp.
- KOOREVAAR, P., G. MENELIK and C. DIRKSEN, 1983. *Elements of soil physics*. Elsevier, Amsterdam, 228 pp.
- PONTE, J.B., 1977. Verschijnselen bij sonderen in zand. *Fugro sondeersymposium, Utrecht, 5 okt.*, pp 17-28.
- REE, W.F. VAN, 1977. Ontwikkeling van de sondeermethode in de laatste vijf jaar. *Fugro sondeersymposium, Utrecht, 5 okt.*, pp. 9-15.
- SANGLERAT, G., 1972. *The penetrometer and soil exploitation*. Elsevier, Amsterdam, 464 pp.
- SMITS, F.P., 1977. Sonderen in zand en theoretische basis voor analyse van de conusweerstand. *Fugro sondeersymposium, Utrecht, 5 okt.*, pp. 29-42.

- SOANE, B.D., 1970. The effects of traffic and implements on soil compaction. *J. and Proc. of the institution of Agric. En.* 25, 3, pp. 115-126.
- TAYLOR, H.M., and E. BURNETT, 1964. Influence of soil strength on the root growth habits of plants. *Soil Science* 98, 3, pp. 174-180.
- TAYLOR, H.M., and R.R. BRUCE, 1968. Effects of soil strength on root growth and crop yield in the southern United States. *Trans. 9th. Int. Congr. Soil Sci., Adelaide, Australia, vol. 1*, pp. 803-811.
- TAYLOR, H.M., and H.R. GARDNER, 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science* 96, 3, pp. 153-156.
- TAYLOR, H.M., G.M. ROBERSON and J.J. PARKER jr., 1966. Soil strength - root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Science* 102, 1, pp. 18-22.
- TIJINK, F.G.J. en P. VAANDRAGER, 1983. De conusvorm bij penetrometer waarnemingen. *Cultuurtechnisch Tijdschrift* 22, 6, pp. 377-383.
- TOLLNER, E.W., 1984. A lubricated cone penetrometer for quantifying the soil physical condition. *Proc. 8th. Int. Conf. of the ISTUS, Cambridge*, pp. 1171-1187.
- TOWNER, G.D. and E.C. CHILDS, 1972. The mechanical strength of unsaturated porous granular material. *J. of Soil Sci.* 23, 4, pp. 481-498.
- TURNAGE, G.W. and D.R. FREITAG, 1969. Effects of cone velocity and size on soil penetration resistance. *Am. Soc. Agric. En., Paper no. 69*, pp. 670.
- WARKENTIN, B.P., 1971. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. *Compaction of agricultural soils, ASAE*, pp. 126-153.
- WIJK, A.L.M. VAN, 1984. Physical soil degradation: analysis, modeling and effects of soil compaction due to field traffic in modern agriculture. *ICW nota 1524*, 50 pp.
- WITNEY, B.D., E.B. ELBANNA and K. ERADAT OSKOU, 1984. Tractor power selection with compaction constraints. *Proc. 8th. Int. Conf. of the ISTUS, Cambridge*, pp. 761-773.

BIJLAGE 1 RESULTATEN PROEFBAK

Rand, aantal = 11						Midden, aantal = 6						Scheidingslijn, aantal = 3					
diepte	γ	Iw	SD	h	θ	diepte	γ	Iw	SD	h	θ	diepte	γ	Iw	SD	h	θ
cm	g/cm ³	kgf	kgf	cmH ₂ O	gew%	cm	g/cm ³	kgf	kgf	cmH ₂ O	gew%	cm	g/cm ³	kgf	kgf	cmH ₂ O	gew%
Metingen 8% vocht, dichtheid 1.5 g/cm ³ , conus 1.0 cm ²																	
21.0	1.452	8.6	3.0	104.5	8.1	21.0	1.458	10.2	1.0	104.5	8.1	21.0	1.444	5.3	0.6	104.5	8.1
24.5	1.454	9.1	2.7	102.0	8.1	24.5	1.459	11.7	0.8	102.0	8.1	24.5	1.447	5.7	0.6	102.0	8.1
28.0	1.457	8.7	2.1	99.5	8.2	28.0	1.468	11.5	1.4	99.5	8.2	28.0	1.441	6.7	1.5	99.5	8.2
31.5	1.463	10.5	2.1	97.0	8.2	31.5	1.480	13.0	1.7	97.0	8.2	31.5	1.438	6.7	1.5	97.0	8.2
35.0	1.469	12.5	2.6	95.0	8.3	35.0	1.493	14.3	2.0	95.0	8.3	35.0	1.436	8.3	2.5	95.0	8.3
38.5	1.477	14.5	2.8	93.0	8.3	38.5	1.503	16.3	1.8	93.0	8.3	38.5	1.440	9.0	2.0	93.0	8.3
42.0	1.490	24.2	5.1	91.0	8.4	42.0	1.506	20.0	2.8	91.0	8.4	42.0	1.470	14.3	1.5	91.0	8.4
45.5	1.507	22.5	3.1	89.0	8.4	45.5	1.509	20.3	3.9	89.0	8.4	45.5	1.494	12.7	2.1	89.0	8.4

Rand, aantal = 8

Midden, aantal = 8

Scheidingslijn, aantal = 4

Metingen 8% vocht, dichtheid 1.5 g/cm³, conus 1.3 cm²

21.0	1.452	10.6	4.8	104.5	8.1	21.0	1.458	12.8	2.3	104.5	8.1	21.0	1.444	7.8	1.0	104.5	8.1
24.5	1.454	9.3	3.8	102.0	8.1	24.5	1.459	12.5	2.3	102.0	8.1	24.5	1.447	6.8	0.5	102.0	8.1
28.0	1.457	9.1	3.9	99.5	8.2	28.0	1.468	12.0	3.2	99.5	8.2	28.0	1.441	6.0	0.8	99.5	8.2
31.5	1.463	9.5	2.7	97.0	8.2	31.5	1.480	11.9	3.3	97.0	8.2	31.5	1.438	7.6	1.0	97.0	8.2
35.0	1.469	10.3	2.5	95.0	8.3	35.0	1.493	12.8	2.9	95.0	8.3	35.0	1.436	8.8	1.5	95.0	8.3
38.5	1.477	12.1	1.9	93.0	8.3	38.5	1.503	15.0	2.5	93.0	8.3	38.5	1.440	11.5	1.3	93.0	8.3
42.0	1.490	17.8	4.1	91.0	8.4	42.0	1.506	17.8	2.1	91.0	8.4	42.0	1.470	12.3	2.6	91.0	8.4
45.5	1.507	21.1	3.6	89.0	8.5	45.5	1.509	19.0	5.0	89.0	8.5	45.5	1.494	16.8	3.3	89.0	8.5

Rand, aantal = 11

Midden, aantal = 6

Scheidingslijn, aantal = 3

Metingen 8% vocht, dichtheid 1.6 g/cm³, conus 1.0 cm²

21.0	1.495	19.7	3.7	112.0	7.9	21.0	1.513	29.2	3.1	112.0	7.9	21.0	1.492	14.3	2.3	112.0	7.9
24.5	1.501	21.1	3.4	109.0	7.9	24.5	1.517	30.3	1.9	109.0	7.9	24.5	1.495	14.7	2.1	109.0	7.9
28.0	1.498	23.0	3.9	106.0	7.9	28.0	1.513	31.8	2.5	106.0	7.9	28.0	1.489	18.3	1.5	106.0	7.9
31.5	1.498	23.6	3.2	103.0	8.0	31.5	1.514	33.0	3.7	103.0	8.0	31.5	1.488	19.7	0.6	103.0	8.0
35.0	1.506	24.6	4.3	101.0	8.0	35.0	1.524	33.5	2.3	101.0	8.0	35.0	1.504	20.7	1.5	101.0	8.0
38.5	1.519	26.6	5.3	99.0	8.0	38.5	1.536	32.8	2.3	99.0	8.0	38.5	1.526	22.7	2.5	99.0	8.0
42.0	1.545	30.7	3.5	97.0	8.1	42.0	1.560	33.8	2.7	97.0	8.1	42.0	1.560	29.0	5.3	97.0	8.1
45.5	1.572	29.8	4.0	95.0	8.1	45.5	1.583	32.8	3.9	95.0	8.1	45.5	1.593	27.3	5.0	95.0	8.1

Metingen 8% vocht, dichtheid 1.6 g/cm³, conus 1.3 cm²

21.0	1.495	18.4	4.1	112.0	7.9	21.0	1.513	28.9	3.9	112.0	7.9	21.0	1.492	18.3	2.2	112.0	7.9
24.5	1.501	18.1	3.4	109.0	8.0	24.5	1.517	29.1	4.4	109.0	8.0	24.5	1.495	20.8	1.0	109.0	8.0
28.0	1.498	18.6	3.4	106.0	8.0	28.0	1.513	30.3	4.8	106.0	8.0	28.0	1.489	23.8	3.5	106.0	8.0
31.5	1.498	20.1	3.2	103.0	8.0	31.5	1.514	32.8	5.7	103.0	8.0	31.5	1.488	26.0	2.7	103.0	8.0
35.0	1.506	22.4	2.3	101.0	8.0	35.0	1.524	32.0	4.8	101.0	8.0	35.0	1.504	26.0	2.2	101.0	8.0
38.5	1.519	26.1	2.0	99.0	8.1	38.5	1.536	32.4	4.0	99.0	8.1	38.5	1.526	26.5	1.3	99.0	8.1
42.0	1.545	33.0	2.4	97.0	8.1	42.0	1.560	35.0	5.3	97.0	8.1	42.0	1.560	31.8	1.5	97.0	8.1
45.5	1.572	36.1	3.9	95.0	8.1	45.5	1.583	34.1	5.4	95.0	8.1	45.5	1.593	31.0	4.2	95.0	8.1

BIJLAGE 1 RESULTATEN PROEFBAK (vervolg)

Los, aantal = 5						Gemiddeld, aantal = 10						Vast, aantal = 5					
diepte cm	γ g/cm ³	Iw kgf	SD kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	diepte cm	γ g/cm ³	Iw kgf	SD kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	diepte cm	γ g/cm ³	Iw kgf	SD kgf	h cmH ₂ O	θ gew%
Metingen 11% vocht, dichtheid 1.5 g/cm ³ , conus 1.0 cm ²																	
21.0	1.416	4.6	1.1	64.0	10.5	21.0	1.466	7.8	1.5	64.0	10.5	21.0	1.525	9.4	1.1	64.0	10.5
24.5	1.421	4.2	1.3	61.5	10.6	24.5	1.481	7.9	1.7	61.5	10.6	24.5	1.532	10.6	1.3	61.5	10.6
28.0	1.424	4.6	1.7	58.5	10.6	28.0	1.483	9.0	2.0	58.5	10.6	28.0	1.542	12.4	1.9	58.5	10.6
31.5	1.426	5.6	1.3	56.5	10.7	31.5	1.485	8.7	1.4	56.5	10.7	31.5	1.551	13.6	2.5	56.5	10.7
35.0	1.428	5.8	1.5	54.5	10.9	35.0	1.491	8.6	2.8	54.5	10.9	35.0	1.558	14.8	2.5	54.5	10.9
38.5	1.434	6.0	1.4	53.0	11.2	38.5	1.498	8.5	3.0	53.0	11.2	38.5	1.570	16.8	2.4	53.0	11.2
42.0	1.451	6.6	1.3	51.0	11.3	42.0	1.508	9.3	2.8	51.0	11.3	42.0	1.591	19.4	1.7	51.0	11.3
45.5	1.468	7.2	1.3	49.5	11.4	45.5	1.520	9.8	2.9	49.5	11.4	45.5	1.612	19.4	2.5	49.5	11.4

Los, aantal = 5

Gemiddeld, aantal = 15

Metingen 11% vocht, dichtheid 1.5 g/cm³, conus 1.3 cm²

21.0	1.416	4.2	1.3	64.0	10.5	21.0	1.466	9.4	1.5	64.0	10.5
24.5	1.421	4.0	1.7	61.5	10.6	24.5	1.481	10.5	1.5	61.5	10.6
28.0	1.424	6.0	1.9	58.5	10.6	28.0	1.483	10.1	1.5	58.5	10.6
31.5	1.426	5.6	1.1	56.5	10.7	31.5	1.485	10.4	2.3	56.5	10.7
35.0	1.428	4.8	0.8	54.5	10.9	35.0	1.491	10.5	2.8	54.5	10.9
38.5	1.434	5.0	1.2	53.0	11.2	38.5	1.498	10.1	2.7	53.0	11.2
42.0	1.451	4.6	0.9	51.0	11.3	42.0	1.508	10.2	2.7	51.0	11.3
45.5	1.468	5.2	1.1	49.5	11.4	45.5	1.520	12.5	2.8	49.5	11.4

Los, aantal = 5

Gemiddeld, aantal = 10

Vast, aantal = 5

Metingen 11% vocht, dichtheid 1.6 g/cm³, conus 1.0 cm²

21.0	1.544	10.0	0.7	63.0	10.4	21.0	1.576	18.8	2.1	63.0	10.4	21.0	1.601	22.8	1.3	63.0	10.4
24.5	1.547	11.6	0.5	63.0	10.4	24.5	1.591	18.0	3.9	63.0	10.4	24.5	1.604	25.4	2.6	63.0	10.4
28.0	1.541	11.4	2.1	63.0	10.4	28.0	1.582	18.6	3.7	63.0	10.4	28.0	1.610	26.8	3.8	63.0	10.4
31.5	1.544	12.2	1.1	62.5	10.4	31.5	1.585	20.4	3.9	62.5	10.4	31.5	1.620	28.2	3.4	62.5	10.4
35.0	1.563	15.8	2.5	61.5	10.4	35.0	1.602	24.1	4.0	61.5	10.4	35.0	1.639	30.4	3.0	61.5	10.4
38.5	1.576	16.8	2.9	60.0	10.5	38.5	1.613	25.7	3.1	60.0	10.5	38.5	1.648	30.2	4.3	60.0	10.5
42.0	1.570	14.0	1.4	58.5	10.5	42.0	1.605	25.7	4.7	58.5	10.5	42.0	1.634	29.8	4.2	58.5	10.5
45.5	1.565	14.8	1.3	57.0	10.5	45.5	1.597	25.7	4.1	57.0	10.5	45.5	1.620	31.0	3.8	57.0	10.5

Los, aantal = 5

Gemiddeld, aantal = 10

Vast, aantal = 5

Metingen 11% vocht, dichtheid 1.6 g/cm³, conus 1.3 cm²

21.0	1.515	10.8	0.8	63.0	10.4	21.0	1.576	16.2	2.9	63.0	10.4	21.0	1.601	21.0	2.3	63.0	10.4
24.5	1.517	12.4	2.5	63.0	10.4	24.5	1.591	17.9	3.1	63.0	10.4	24.5	1.604	21.2	3.1	63.0	10.4
28.0	1.512	12.0	2.9	63.0	10.4	28.0	1.582	18.3	2.6	63.0	10.4	28.0	1.610	23.0	4.5	63.0	10.4
31.5	1.510	11.4	3.1	62.5	10.4	31.5	1.585	19.2	3.5	62.5	10.4	31.5	1.620	24.4	3.8	62.5	10.4
35.0	1.518	12.6	2.3	61.5	10.4	35.0	1.602	22.5	3.5	61.5	10.4	35.0	1.639	27.0	4.5	61.5	10.4
38.5	1.526	12.2	2.6	60.0	10.5	38.5	1.613	23.6	2.9	60.0	10.5	38.5	1.648	29.2	3.6	60.0	10.5
42.0	1.535	12.8	2.4	58.5	10.5	42.0	1.605	24.7	3.3	58.5	10.5	42.0	1.634	27.8	1.6	58.5	10.5
45.5	1.542	13.8	1.8	57.0	10.5	45.5	1.597	26.7	3.6	57.0	10.5	45.5	1.620	28.4	3.2	57.0	10.5

BIJLAGE 1 RESULTATEN PROEFBAK (vervolg)

Los, aantal = 10						Vast, aantal = 10					
diepte cm	γ g/cm ³	Iw kgf	SD kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	diepte cm	γ g/cm ³	Iw kgf	SD kgf	h cmH ₂ O	θ gew%
Metingen 14% vocht, dichtheid 1.5 g/cm ³ , conus 1.0 cm ²											
21.0	1.584	9.9	1.2	30.5	13.8	21.0	1.615	11.9	1.1	30.5	13.8
24.5	1.573	9.9	1.4	29.5	13.8	24.5	1.609	13.5	1.6	29.5	13.8
28.0	1.568	10.4	2.6	28.5	13.8	28.0	1.611	15.0	1.9	28.5	13.8
31.5	1.583	10.1	1.9	27.0	13.8	31.5	1.614	15.2	2.0	27.0	13.8
35.0	1.584	10.9	1.4	25.5	14.0	35.0	1.619	15.0	1.6	25.5	14.0
38.5	1.573	10.1	1.5	23.5	14.3	38.5	1.620	13.6	2.2	23.5	14.3
42.0	1.574	9.5	1.2	22.0	14.5	42.0	1.608	11.7	2.6	22.0	14.5
45.5	1.577	9.4	1.7	20.0	14.8	45.5	1.597	11.0	2.7	20.0	14.8

Los, aantal = 15

Vast, aantal = 5

Metingen 14% vocht, dichtheid 1.5 g/cm³, conus 1.3 cm²

21.0	1.584	8.4	1.5	30.5	13.8	21.0	1.608	12.0	1.6	30.5	13.8
24.5	1.573	8.4	1.2	29.5	13.8	24.5	1.603	12.0	2.0	29.5	13.8
28.0	1.569	8.9	1.3	28.5	13.8	28.0	1.606	11.8	2.2	28.5	13.8
31.5	1.583	9.5	1.6	27.0	13.8	31.5	1.625	12.8	0.8	27.0	13.8
35.0	1.584	9.7	1.0	25.5	14.0	35.0	1.632	13.6	2.7	25.5	14.0
38.5	1.573	9.1	1.5	23.5	14.3	38.5	1.626	12.2	2.9	23.5	14.3
42.0	1.574	9.7	2.3	22.0	14.5	42.0	1.618	13.2	2.4	22.0	14.5
45.5	1.576	9.6	2.0	20.0	14.8	45.5	1.610	12.8	2.5	20.0	14.8

BIJLAGE 2 INDELING IN GROEPEN MET ONGEVEER GELIJKE DICHTHEID

$\gamma = 1.41-1.45 \text{ g/cm}^3$								$\gamma = 1.45-1.49 \text{ g/cm}^3$							
γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O	γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O
1.444	5.3	104.5	8.1	11.7	0.451	0.259	50.3	1.452	8.6	104.5	8.1	11.8	0.448	0.262	50.5
1.447	5.7	102.0	8.1	11.7	0.450	0.260	49.2	1.454	9.1	102.0	8.1	11.8	0.448	0.263	49.4
1.441	6.7	99.5	8.2	11.8	0.453	0.261	48.0	1.457	8.7	99.5	8.2	11.9	0.446	0.268	48.5
1.438	6.7	97.0	8.2	11.8	0.454	0.260	46.7	1.463	10.5	97.0	8.2	12.0	0.444	0.270	47.4
1.436	8.3	95.0	8.3	11.9	0.454	0.262	45.9	1.469	12.5	95.0	8.3	12.2	0.442	0.276	46.8
1.440	9.0	93.0	8.3	12.0	0.453	0.264	45.1	1.477	14.5	93.0	8.3	12.3	0.439	0.279	46.1
1.444	7.8	104.5	8.1	11.7	0.451	0.259	50.3	1.490	24.2	91.0	8.4	12.5	0.434	0.288	45.7
1.447	6.8	102.0	8.1	11.7	0.450	0.260	49.2	1.458	10.2	104.5	8.1	11.8	0.446	0.265	50.7
1.441	6.0	99.5	8.2	11.8	0.453	0.261	48.0	1.459	11.7	102.0	8.1	11.8	0.446	0.265	49.5
1.438	7.8	97.0	8.2	11.8	0.454	0.260	46.7	1.468	11.5	99.5	8.2	12.0	0.442	0.272	48.8
1.436	8.8	95.0	8.3	11.9	0.454	0.262	45.9	1.480	13.0	97.0	8.2	12.1	0.438	0.277	47.9
1.440	11.5	93.0	8.3	12.0	0.453	0.264	45.1	1.470	14.3	91.0	8.4	12.3	0.442	0.280	45.1
1.416	4.6	64.0	10.5	14.9	0.462	0.322	33.6	1.488	19.7	103.0	8.0	11.9	0.435	0.274	50.6
1.421	4.2	61.5	10.6	15.1	0.460	0.327	32.5	1.489	18.3	106.0	7.9	11.8	0.434	0.271	51.9
1.424	4.6	58.5	10.6	15.1	0.459	0.329	31.0	1.452	10.6	104.5	8.1	11.8	0.448	0.262	50.5
1.426	5.6	56.5	10.7	15.3	0.458	0.333	30.1	1.454	9.3	102.0	8.1	11.8	0.448	0.263	49.4
1.428	5.8	54.5	10.9	15.6	0.458	0.340	29.3	1.457	9.1	99.5	8.2	11.9	0.446	0.268	48.5
1.434	6.0	53.0	11.2	16.1	0.455	0.353	29.0	1.463	9.5	97.0	8.2	12.0	0.444	0.270	47.4
1.416	4.2	64.0	10.5	14.9	0.462	0.322	33.6	1.469	10.3	95.0	8.3	12.2	0.442	0.276	46.8
1.421	4.0	61.5	10.6	15.1	0.460	0.327	32.5	1.477	12.1	93.0	8.3	12.3	0.439	0.279	46.1
1.424	6.0	58.5	10.6	15.1	0.459	0.329	31.0	1.490	17.8	91.0	8.4	12.5	0.434	0.288	45.7
1.426	5.6	56.5	10.7	15.3	0.458	0.333	30.1	1.458	12.8	104.5	8.1	11.8	0.446	0.265	50.7
1.428	4.8	54.5	10.9	15.6	0.458	0.340	29.3	1.459	12.5	102.0	8.1	11.8	0.446	0.265	49.5
1.434	5.0	53.0	11.2	16.1	0.455	0.353	29.0	1.468	12.0	99.5	8.2	12.0	0.442	0.272	48.8
								1.480	11.9	97.0	8.2	12.1	0.438	0.277	47.9
								1.470	12.3	91.0	8.4	12.3	0.442	0.280	45.1
								1.489	23.8	106.0	8.0	11.9	0.434	0.274	52.1
								1.488	26.0	103.0	8.0	11.9	0.435	0.274	50.6
								1.451	6.6	51.0	11.3	16.4	0.449	0.365	28.3
								1.468	7.2	49.5	11.4	16.7	0.442	0.378	28.0
								1.466	7.8	64.0	10.5	15.4	0.443	0.347	34.8
								1.481	7.9	61.5	10.6	15.7	0.437	0.359	33.9
								1.483	9.0	58.5	10.6	15.7	0.437	0.360	32.3
								1.485	8.7	56.5	10.7	15.9	0.436	0.365	31.4
								1.451	4.6	51.0	11.3	16.4	0.449	0.365	28.3
								1.468	5.2	49.5	11.4	16.7	0.442	0.378	28.0
								1.466	9.4	64.0	10.5	15.4	0.443	0.347	34.8
								1.481	10.5	61.5	10.6	15.7	0.437	0.359	33.9
								1.483	10.1	58.5	10.6	15.7	0.437	0.360	32.3
								1.485	10.4	56.5	10.7	15.9	0.436	0.365	31.4

BIJLAGE 2 INDELING IN GROEPEN MET ONGEVEER GELIJKE DICHTHEID (vervolg)

$\gamma = 1.49-1.53 \text{ g/cm}^3$								$\gamma = 1.53-1.57 \text{ g/cm}^3$							
γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O	γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O
1.507	22.5	89.0	8.4	12.7	0.427	0.296	45.1	1.545	30.7	97.0	8.1	12.5	0.413	0.303	49.7
1.493	14.3	95.0	8.3	12.4	0.433	0.286	47.5	1.560	29.0	97.0	8.1	12.6	0.407	0.310	50.2
1.503	16.3	93.0	8.3	12.5	0.429	0.291	46.8	1.560	31.8	97.0	8.1	12.6	0.407	0.310	50.2
1.506	20.0	91.0	8.4	12.7	0.428	0.296	46.1	1.542	12.4	58.5	10.6	16.3	0.414	0.395	33.7
1.509	20.3	89.0	8.4	12.7	0.427	0.297	45.2	1.551	13.6	56.5	10.7	16.6	0.411	0.404	32.9
1.494	12.7	89.0	8.4	12.5	0.432	0.290	44.8	1.558	14.8	54.5	10.9	17.0	0.408	0.416	32.2
1.495	19.7	112.0	7.9	11.8	0.432	0.273	55.0	1.570	16.8	53.0	11.2	17.6	0.404	0.436	32.1
1.501	21.1	109.0	7.9	11.9	0.430	0.276	53.8	1.544	12.2	62.5	10.4	16.1	0.413	0.388	35.7
1.498	23.0	106.0	7.9	11.8	0.431	0.275	52.2	1.563	15.8	61.5	10.4	16.3	0.406	0.400	35.7
1.498	23.6	103.0	8.0	12.0	0.431	0.278	51.0	1.570	14.0	58.5	10.5	16.5	0.404	0.408	34.3
1.506	24.6	101.0	8.0	12.0	0.428	0.282	50.2	1.565	14.8	57.0	10.5	16.4	0.405	0.405	33.3
1.519	26.6	99.0	8.0	12.2	0.423	0.287	49.6	1.535	12.8	58.5	10.5	16.1	0.417	0.387	33.4
1.513	29.2	112.0	7.9	12.0	0.425	0.281	55.6	1.542	13.8	57.0	10.5	16.2	0.414	0.391	32.7
1.517	30.3	109.0	7.9	12.0	0.424	0.283	54.3	1.568	10.4	28.5	13.8	21.6	0.404	0.535	19.2
1.513	31.8	106.0	7.9	12.0	0.425	0.281	52.7	1.569	8.9	28.5	13.8	21.7	0.404	0.536	19.2
1.514	33.0	103.0	8.0	12.1	0.425	0.285	51.5	1.570	9.0	28.0	14.0	22.0	0.404	0.545	19.1
1.524	33.5	101.0	8.0	12.2	0.421	0.290	50.8	1.570	7.0	26.0	14.0	22.0	0.404	0.545	17.7
1.492	14.3	112.0	7.9	11.8	0.433	0.272	54.9	1.570	6.0	25.0	14.0	22.0	0.404	0.545	17.0
1.495	14.7	109.0	7.9	11.8	0.432	0.273	53.6	1.570	9.0	28.0	14.0	22.0	0.404	0.545	19.1
1.504	20.7	101.0	8.0	12.0	0.429	0.281	50.1	1.570	7.0	26.0	14.0	22.0	0.404	0.545	17.7
1.526	22.7	99.0	8.0	12.2	0.420	0.290	49.8	1.570	6.0	25.0	14.0	22.0	0.404	0.545	17.0
1.507	21.1	89.0	8.5	12.8	0.427	0.300	45.4	1.547	11.6	63.0	10.4	16.1	0.412	0.390	36.1
1.493	12.8	95.0	8.3	12.4	0.433	0.286	47.5	1.541	11.4	63.0	10.4	16.0	0.415	0.387	35.9
1.503	15.0	93.0	8.3	12.5	0.429	0.291	46.8	1.532	10.6	61.5	10.6	16.2	0.418	0.388	35.2
1.506	17.8	91.0	8.4	12.7	0.428	0.296	46.1								
1.509	19.0	89.0	8.5	12.8	0.427	0.301	45.4								
1.494	16.8	89.0	8.5	12.7	0.432	0.294	45.0								
1.495	18.4	112.0	7.9	11.8	0.432	0.273	55.0								
1.501	18.1	109.0	8.0	12.0	0.430	0.279	54.0								
1.498	18.6	106.0	8.0	12.0	0.431	0.278	52.4								
1.498	20.1	103.0	8.0	12.0	0.431	0.278	51.0								
1.506	22.4	101.0	8.0	12.0	0.428	0.282	50.2								
1.519	26.1	99.0	8.1	12.3	0.423	0.291	49.9	1.514	32.8	103.0	8.0	12.1	0.425	0.285	51.5
1.517	29.1	109.0	8.0	12.1	0.424	0.286	54.6	1.513	26.9	112.0	7.9	12.0	0.425	0.281	55.6
1.524	32.0	101.0	8.0	12.2	0.421	0.290	50.8	1.513	30.3	106.0	8.0	12.1	0.425	0.285	52.9
1.495	20.8	109.0	8.0	12.0	0.432	0.277	53.8	1.492	18.3	112.0	7.9	11.8	0.433	0.272	54.9
1.526	26.5	99.0	8.1	12.4	0.420	0.294	50.1	1.504	26.0	101.0	8.0	12.0	0.429	0.281	50.1
1.498	8.5	53.0	11.2	16.8	0.431	0.389	30.3	1.491	8.6	54.5	10.9	16.3	0.434	0.375	30.6
1.520	9.8	49.5	11.4	17.3	0.423	0.410	29.1	1.508	9.3	51.0	11.3	17.0	0.427	0.399	29.5
1.498	10.1	53.0	11.2	16.8	0.431	0.389	30.3	1.525	9.4	64.0	10.5	16.0	0.421	0.381	36.3
1.520	12.5	49.5	11.4	17.3	0.423	0.410	29.1	1.508	10.2	51.0	11.3	17.0	0.427	0.399	29.5
1.517	12.4	63.0	10.4	15.8	0.424	0.372	35.3	1.515	10.8	63.0	10.4	15.8	0.424	0.371	35.3
1.512	12.0	63.0	10.4	15.7	0.426	0.369	35.2	1.491	10.5	54.5	10.9	16.3	0.434	0.375	30.6
1.518	12.6	61.5	10.4	15.8	0.423	0.373	34.5	1.510	11.4	62.5	10.4	15.7	0.426	0.368	34.9
								1.526	12.2	60.0	10.5	16.0	0.420	0.381	34.0

vervolg $\gamma = 1.49-1.53 \text{ g/cm}^3$

BIJLAGE 2 INDELING IN GROEPEN MET ONGEVEER GELIJKE DICHTHEID (vervolg)

$\gamma = 1.57-1.61 \text{ g/cm}^3$								$\gamma = 1.61-1.65 \text{ g/cm}^3$							
γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O	γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O
1.572	29.8	95.0	8.1	12.7	0.403	0.316	49.5	1.612	19.4	49.5	11.4	18.4	0.388	0.474	31.3
1.583	32.8	95.0	8.1	12.8	0.399	0.322	49.9	1.613	25.7	60.0	10.5	16.9	0.387	0.437	36.4
1.593	27.3	95.0	8.1	12.9	0.395	0.327	50.2	1.620	28.2	62.5	10.4	16.8	0.385	0.438	37.9
1.572	36.1	95.0	8.1	12.7	0.403	0.316	49.5	1.639	30.4	61.5	10.4	17.0	0.377	0.452	37.9
1.583	34.1	95.0	8.1	12.8	0.399	0.322	49.9	1.648	30.2	60.0	10.5	17.3	0.374	0.463	37.4
1.593	31.0	95.0	8.1	12.9	0.395	0.327	50.2	1.634	29.8	58.5	10.5	17.2	0.379	0.452	36.1
1.591	19.4	51.0	11.3	18.0	0.396	0.454	31.5	1.620	31.0	57.0	10.5	17.0	0.385	0.442	34.7
1.576	16.8	60.0	10.5	16.5	0.401	0.412	35.3	1.613	23.6	60.0	10.5	16.9	0.387	0.437	36.4
1.576	16.8	63.0	10.4	16.4	0.401	0.408	36.9	1.620	24.4	62.5	10.4	16.8	0.385	0.438	37.9
1.591	18.0	63.0	10.4	16.5	0.396	0.418	37.3	1.639	27.0	61.5	10.4	17.0	0.377	0.452	37.9
1.582	18.6	63.0	10.4	16.5	0.399	0.412	37.1	1.648	29.2	60.0	10.5	17.3	0.374	0.463	37.4
1.585	20.4	62.5	10.4	16.5	0.398	0.414	36.9	1.634	27.8	58.5	10.5	17.2	0.379	0.452	36.1
1.602	24.1	61.5	10.4	16.7	0.391	0.426	36.8	1.620	28.4	57.0	10.5	17.0	0.385	0.442	34.7
1.605	25.7	58.5	10.5	16.9	0.390	0.432	35.2	1.611	15.0	28.5	13.8	22.2	0.388	0.573	20.0
1.597	25.7	57.0	10.5	16.8	0.393	0.426	34.1	1.614	15.2	27.0	13.8	22.3	0.387	0.576	19.0
1.601	22.8	63.0	10.4	16.7	0.392	0.425	37.6	1.615	11.9	30.5	13.8	22.3	0.386	0.577	21.5
1.604	25.4	63.0	10.4	16.7	0.391	0.427	37.7	1.620	13.6	23.5	14.3	23.2	0.385	0.602	17.0
1.610	26.8	63.0	10.4	16.7	0.388	0.431	37.9	1.619	15.0	25.5	14.0	22.7	0.385	0.589	18.2
1.576	16.2	63.0	10.4	16.4	0.401	0.408	36.9	1.625	12.8	27.0	13.8	22.4	0.383	0.586	19.2
1.591	17.9	63.0	10.4	16.5	0.396	0.418	37.3	1.632	13.6	25.5	14.0	22.8	0.380	0.601	18.4
1.582	18.3	63.0	10.4	16.5	0.399	0.412	37.1	1.626	12.2	23.5	14.3	23.3	0.382	0.608	17.1
1.585	19.2	62.5	10.4	16.5	0.398	0.414	36.9	1.618	13.2	22.0	14.5	23.5	0.385	0.609	16.0
1.602	22.5	61.5	10.4	16.7	0.391	0.426	36.8								
1.605	24.7	58.5	10.5	16.9	0.390	0.432	35.2								
1.597	26.7	57.0	10.5	16.8	0.393	0.426	34.1								
1.601	21.0	63.0	10.4	16.7	0.392	0.425	37.6								
1.604	21.2	63.0	10.4	16.7	0.391	0.427	37.7								
1.610	23.0	63.0	10.4	16.7	0.388	0.431	37.9								
1.573	10.1	23.5	14.3	22.5	0.402	0.559	16.2								
1.573	9.9	29.5	13.8	21.7	0.402	0.539	20.0								
1.574	9.5	22.0	14.5	22.8	0.402	0.568	15.3								
1.577	9.4	20.0	14.8	23.3	0.401	0.582	14.2								
1.583	10.1	27.0	13.8	21.8	0.399	0.548	18.5								
1.584	9.9	30.5	13.8	21.9	0.398	0.549	20.9								
1.584	10.9	25.5	14.0	22.2	0.398	0.557	17.6								
1.597	11.0	20.0	14.8	23.6	0.393	0.601	14.4								
1.609	13.5	29.5	13.8	22.2	0.389	0.571	20.6								
1.573	8.4	29.5	13.8	21.7	0.402	0.539	20.0	1.608	11.7	22.0	14.5	23.3	0.389	0.599	15.8
1.584	9.7	25.5	14.0	22.2	0.398	0.557	17.6	1.584	8.4	30.5	13.8	21.9	0.398	0.549	20.9
1.574	9.7	22.0	14.5	22.8	0.402	0.568	15.3	1.583	9.5	27.0	13.8	21.8	0.399	0.548	18.5
1.608	12.0	30.5	13.8	22.2	0.389	0.570	21.3	1.573	9.1	23.5	14.3	22.5	0.402	0.559	16.2
1.606	11.8	28.5	13.8	22.2	0.390	0.568	19.9	1.576	9.6	20.0	14.8	23.3	0.401	0.581	14.1
								1.603	12.0	29.5	13.8	22.1	0.391	0.566	20.5
								1.610	12.8	20.0	14.8	23.8	0.388	0.614	14.6

BIJLAGE 3 RESULTATEN PROEVENSERIE WESTERHOVEN

plaats 0 cm, aantal = 4						plaats 30 cm, aantal = 6					
diepte cm	γ g/cm ³	Iw kgf	SD kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	diepte cm	γ g/cm ³	Iw kgf	SD kgf	h cmH ₂ O	θ gew%
Metingen verricht 3 juni 1987											
20.0	1.432	11.5	1.7	85.0	15.5	20.0	1.477	9.2	2.2	85.0	15.5
25.0	1.415	10.0	1.4	100.0	16.1	25.0	1.447	9.3	1.2	100.0	16.1
30.0	1.407	11.0	2.2	115.0	14.8	30.0	1.493	15.7	3.6	115.0	14.8
35.0	1.382	8.5	1.3	128.0	13.6	35.0	1.540	32.5	5.5	128.0	13.6
40.0	1.385	8.0	3.5	140.0	11.8	40.0	1.562	33.0	3.6	140.0	11.8
45.0	1.430	16.5	4.0	140.0	9.9	45.0	1.583	32.3	3.5	140.0	9.9
50.0	1.475	23.8	5.4	141.0	9.8	50.0	1.563	30.5	3.7	141.0	9.8
55.0	1.530	22.5	5.0	140.0	9.6	55.0	1.544	31.3	4.6	140.0	9.6
60.0	1.500	24.3	1.2	140.0	9.5	60.0	1.510	28.5	4.8	140.0	9.5
65.0	1.455	24.3	5.0	130.0	9.4	65.0	1.475	28.5	2.6	130.0	9.4
70.0	1.504	30.0	1.0	125.0	10.0	70.0	1.462	26.8	4.1	125.0	10.0
plaats 45 cm, aantal = 6						plaats 15 cm, aantal = 4					
20.0	1.392	9.3	0.5	85.0	15.5	20.0	1.432	10.5	1.3	85.0	15.5
25.0	1.392	8.5	1.0	100.0	16.1	25.0	1.415	11.0	1.8	100.0	16.1
30.0	1.420	11.2	2.5	115.0	14.8	30.0	1.416	10.8	2.2	115.0	14.8
35.0	1.485	27.3	5.6	128.0	13.6	35.0	1.436	22.6	9.7	128.0	13.6
40.0	1.524	32.7	3.8	140.0	11.8	40.0	1.450	22.3	2.5	140.0	11.8
45.0	1.542	31.4	3.6	140.0	9.9	45.0	1.554	26.8	6.3	140.0	9.9
50.0	1.545	32.8	4.1	141.0	9.8	50.0	1.558	31.5	7.0	141.0	9.8
55.0	1.530	29.5	4.7	140.0	9.6	55.0	1.563	30.0	8.5	140.0	9.6
60.0	1.500	27.3	6.6	140.0	9.5	60.0	1.553	35.0	4.9	140.0	9.5
65.0	1.455	28.4	7.9	130.0	9.4	65.0	1.542	31.8	2.2	130.0	9.4
70.0	1.463	30.3	7.4	125.0	10.0	70.0	1.505	30.0	5.1	125.0	10.0

BIJLAGE 3 RESULTATEN PROEVENSERIE WESTERHOVEN (vervolg)

plaats 15 cm, aantal = 13						plaats 30 cm, aantal = 14						plaats 45 cm, aantal = 14					
diepte	γ	Iw	SD	h	θ	diepte	γ	Iw	SD	h	θ	diepte	γ	Iw	SD	h	θ
cm	g/cm ³	kgf	kgf	cmH ₂ O	gew%	cm	g/cm ³	kgf	kgf	cmH ₂ O	gew%	cm ³	g/cm	kgf	kgf	cmH ₂ O	gew%
Metingen verricht 3 juli 1987																	
20.0	1.477	18.5	2.4	475.0	11.2	20.0	1.392	17.8	2.4	475.0	11.9	20.0	1.432	15.1	3.2	475.0	11.9
25.0	1.447	16.3	2.1	320.0	11.6	25.0	1.392	17.7	2.1	320.0	12.0	25.0	1.416	14.6	2.8	320.0	12.0
30.0	1.475	18.3	2.0	165.0	11.9	30.0	1.423	21.6	3.0	165.0	11.8	30.0	1.407	12.1	2.0	165.0	11.8
30.0	1.512	28.5	2.7	165.0	11.9												
35.0	1.540	34.5	2.8	153.0	12.2	35.0	1.431	21.0	1.7	153.0	11.5	35.0	1.382	10.1	1.7	153.0	11.5
						35.0	1.481	30.9	3.3	153.0	11.5	35.0	1.416	15.3	0.5	153.0	11.5
40.0	1.562	34.1	3.6	170.0	10.6	40.0	1.520	31.5	3.2	170.0	9.5	40.0	1.385	9.4	2.2	170.0	9.8
												40.0	1.487	18.8	3.6	170.0	9.8
45.0	1.583	31.5	5.0	146.0	8.9	45.0	1.589	34.6	2.5	146.0	8.1	45.0	1.387	8.5	1.8	146.0	8.1
												45.0	1.470	19.0	2.0	146.0	8.1
												45.0	1.554	29.7	2.3	146.0	8.1
50.0	1.563	27.2	5.4	123.0	8.8	50.0	1.576	35.6	3.6	123.0	8.3	50.0	1.475	22.3	4.4	123.0	8.3
												50.0	1.558	33.5	4.3	123.0	8.3
55.0	1.544	24.2	4.1	117.0	8.7	55.0	1.563	32.4	3.9	117.0	9.4	55.0	1.563	35.8	2.6	117.0	9.4
60.0	1.510	21.8	3.7	112.0	9.0	60.0	1.548	29.0	3.6	112.0	9.4	60.0	1.553	34.9	3.6	112.0	9.4
65.0	1.475	16.6	3.3	110.0	9.4	65.0	1.533	28.9	4.0	110.0	9.4	65.0	1.542	31.8	4.2	110.0	9.4
70.0	1.462	24.5	4.4	108.0	9.7	70.0	1.476	28.6	4.6	108.0	9.5	70.0	1.504	28.9	3.5	108.0	11.0

plaats 15 cm, aantal = 7

plaats 30 cm, aantal = 7

plaats 45 cm, aantal = 6

Metingen verricht 14 juli 1987

25.0	1.447	21.6	4.4	740.0	4.2	25.0	1.392	28.0	3.4	740.0	4.2	25.0	1.415	16.5	2.7	740.0	4.2
30.0	1.492	31.1	5.8	640.0	4.6	30.0	1.423	37.3	4.3	640.0	4.6	30.0	1.407	12.8	3.0	640.0	4.6
35.0	1.540	54.4	3.8	640.0	4.2	35.0	1.431	42.0	6.1	640.0	4.2	35.0	1.399	9.2	2.6	640.0	4.2
40.0	1.562	53.3	4.5	740.0	3.9	40.0	1.520	50.7	4.3	740.0	3.9	40.0	1.393	10.7	8.1	740.0	3.9
45.0	1.583	45.7	6.0	570.0	4.4	45.0	1.589	47.0	3.9	570.0	4.4	45.0	1.387	6.0	1.7	570.0	4.4
												45.0	1.554	25.7	5.5	570.0	4.4
50.0	1.563	38.3	5.8	310.0	5.1	50.0	1.576	37.6	3.6	310.0	5.1	50.0	1.558	38.7	2.9	310.0	5.1
												50.0	1.475	22.0	1.7	310.0	5.1
55.0	1.544	32.0	4.6	270.0	6.1	55.0	1.563	29.1	3.6	270.0	6.1	55.0	1.563	37.0	3.9	270.0	6.1
60.0	1.510	27.6	4.2	210.0	7.1	60.0	1.548	26.6	2.3	210.0	7.1	60.0	1.553	36.8	4.0	210.0	7.1
65.0	1.475	22.4	4.6	180.0	7.9	65.0	1.533	23.9	4.6	180.0	7.9	65.0	1.542	35.5	1.4	180.0	7.9
70.0	1.462	28.7	3.2	152.0	8.7	70.0	1.476	31.6	3.8	152.0	8.7	70.0	1.504	34.8	2.6	152.0	8.7

BIJLAGE 4 INDELING IN GROEPEN MET ONGEVEER GELIJK VOCHTGEHALTE

$\theta = 3.5- 6.5$ GEW%				$\theta = 6.5- 9.5$ GEW%			
γ g/cm	Iw kgf	h cm H ₂ O	θ gew%	γ g/cm	Iw kgf	h cm H ₂ O	θ gew%
1.392	28.0	740.0	4.2	1.387	8.5	146.0	8.1
1.407	12.8	640.0	4.6	1.455	24.3	130.0	9.4
1.399	9.2	640.0	4.2	1.455	28.4	130.0	9.4
1.393	10.7	740.0	3.9	1.462	28.7	152.0	8.7
1.387	6.0	570.0	4.4	1.470	19.0	146.0	8.1
1.447	21.6	740.0	4.2	1.475	22.3	123.0	8.3
1.423	37.3	640.0	4.6	1.475	22.4	180.0	7.9
1.431	42.0	640.0	4.2	1.475	28.5	130.0	9.4
1.492	31.1	640.0	4.6	1.504	34.8	152.0	8.7
1.520	50.7	740.0	3.9	1.500	24.3	140.0	9.5
1.540	54.4	640.0	4.2	1.500	27.3	140.0	9.5
1.544	32.0	270.0	6.1	1.510	27.6	210.0	7.1
1.558	38.7	310.0	5.1	1.510	28.5	140.0	9.5
1.562	53.3	740.0	3.9	1.533	23.9	180.0	7.9
1.563	38.3	310.0	5.1	1.548	29.0	112.0	9.4
1.563	29.1	270.0	6.1	1.548	26.6	210.0	7.1
1.563	37.0	270.0	6.1	1.542	35.5	180.0	7.9
1.554	25.7	570.0	4.4	1.542	31.8	130.0	9.4
1.576	37.6	310.0	5.1	1.554	29.7	146.0	8.1
1.583	45.7	570.0	4.4	1.558	33.5	123.0	8.3
1.589	47.0	570.0	4.4	1.553	34.9	112.0	9.4
1.415	16.5	740.0	4.4	1.553	36.8	210.0	7.1
1.475	22.0	310.0	5.1	1.553	35.0	140.0	9.5
				1.563	35.8	117.0	9.4
				1.563	32.4	117.0	9.4
				1.576	35.6	123.0	8.3
				1.589	34.6	146.0	8.1
				1.476	31.6	152.0	8.7
				1.476	28.6	108.0	9.5
				1.520	31.5	170.0	9.5
				1.533	28.9	110.0	9.4
				1.542	31.8	110.0	9.4
				1.380	6.0	100.0	8.0
				1.390	7.0	100.0	8.0
$\theta = 6.5- 9.5$ GEW%				$\theta = 9.5-12.5$ GEW%			
1.385	9.4	170.0	9.8	1.382	8.5	128.0	13.6
1.382	10.1	153.0	11.5	1.392	9.3	85.0	15.5
1.385	8.0	140.0	11.8	1.392	8.5	100.0	16.1
1.407	12.1	165.0	11.8	1.407	11.0	115.0	14.8
1.430	16.5	140.0	9.9	1.415	10.0	100.0	16.1
1.450	22.3	140.0	11.8	1.415	11.0	100.0	16.1
1.462	24.5	108.0	9.7	1.416	10.8	115.0	14.8
1.462	26.8	125.0	10.0	1.420	11.2	115.0	14.8
1.463	30.3	125.0	10.0	1.432	9.3	85.0	15.5
1.475	18.3	165.0	11.9	1.432	10.5	85.0	15.5
1.475	23.8	141.0	9.8	1.436	22.6	128.0	13.6
1.487	18.8	170.0	9.8	1.447	9.3	100.0	16.1
1.504	28.9	108.0	11.0	1.485	27.3	128.0	13.6
1.504	30.0	125.0	10.0	1.477	9.2	85.0	15.5
1.505	30.0	125.0	10.0	1.493	15.7	115.0	14.8

BIJLAGE 4 INDELING IN GROEPEN MET ONGEVEER GELIJK VOCHTGEHALTE (vervolg)

$\theta = 6.5-9.5$ GEW%				$\theta = 9.5-12.5$ GEW%			
γ g/cm	Iw kgf	h cm H ₂ O	θ gew%	γ g/cm	Iw kgf	h cm H ₂ O	θ gew%
1.512	28.5	165.0	11.9	1.382	8.5	128.0	13.6
1.530	22.5	140.0	9.6	1.392	9.3	85.0	15.5
1.530	29.5	140.0	9.6	1.392	8.5	100.0	16.1
1.524	32.7	140.0	11.8	1.407	11.0	115.0	14.8
1.540	34.5	153.0	12.2	1.415	10.0	100.0	16.1
1.544	31.3	140.0	9.6	1.415	11.0	100.0	16.1
1.542	31.4	140.0	9.9	1.416	10.8	115.0	14.8
1.545	32.8	141.0	9.8	1.420	11.2	115.0	14.8
1.554	26.8	140.0	9.9	1.432	9.3	85.0	15.5
1.558	31.5	141.0	9.8	1.432	10.5	85.0	15.5
1.563	30.5	141.0	9.8	1.436	22.6	128.0	13.6
1.563	30.0	140.0	9.6	1.447	9.3	100.0	16.1
1.562	34.1	170.0	10.6	1.485	27.3	128.0	13.6
1.562	33.0	140.0	11.8	1.477	9.2	85.0	15.5
1.583	32.3	140.0	9.9	1.493	15.7	115.0	14.8
1.416	14.6	320.0	12.0				
1.447	16.3	320.0	11.6				
1.477	18.5	475.0	11.2				
1.432	15.1	475.0	11.9				
1.416	15.3	153.0	11.5				

BIJLAGE 5 INDELING IN GROEPEN MET ONGEVEER GELIJKE DICHTHEID

$\gamma = 1.37-1.41 \text{ g/cm}^3$								$\gamma = 1.41-1.45 \text{ g/cm}^3$							
γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O	γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O
1.385	9.4	170.0	9.8	13.6	0.474	0.286	85.1	1.416	14.6	320.0	12.0	17.0	0.462	0.368	178.4
1.382	10.1	153.0	11.5	15.9	0.475	0.335	81.7	1.416	15.3	153.0	11.5	16.3	0.462	0.352	83.6
1.387	8.5	146.0	8.1	11.2	0.473	0.237	68.1	1.415	10.0	100.0	16.1	22.8	0.462	0.493	64.5
1.382	8.5	128.0	13.6	18.8	0.475	0.396	73.9	1.415	11.0	100.0	16.1	22.8	0.462	0.493	64.5
1.385	8.0	140.0	11.8	16.3	0.474	0.345	75.8	1.416	10.8	115.0	14.8	21.0	0.462	0.454	71.0
1.392	17.8	475.0	11.9	16.6	0.471	0.352	259.4	1.423	21.6	165.0	11.8	16.8	0.459	0.366	91.7
1.392	17.7	320.0	12.0	16.7	0.471	0.355	175.4	1.420	11.2	115.0	14.8	21.0	0.461	0.456	71.2
1.392	28.0	740.0	4.2	5.8	0.471	0.124	286.3	1.432	15.1	475.0	11.9	17.0	0.456	0.374	266.8
1.392	9.3	85.0	15.5	21.6	0.471	0.458	52.7	1.431	21.0	153.0	11.5	16.5	0.456	0.361	84.5
1.392	8.5	100.0	16.1	22.4	0.471	0.476	63.3	1.432	9.3	85.0	15.5	22.2	0.456	0.487	54.5
1.407	12.8	640.0	4.6	6.5	0.465	0.139	254.3	1.430	16.5	140.0	9.9	14.2	0.457	0.310	72.4
1.407	12.1	165.0	11.8	16.6	0.465	0.357	90.7	1.432	10.5	85.0	15.5	22.2	0.456	0.487	54.5
1.407	11.0	115.0	14.8	20.8	0.465	0.447	70.5	1.436	22.6	128.0	13.6	19.5	0.454	0.430	76.9
1.399	9.2	640.0	4.2	5.9	0.469	0.125	248.2	1.447	16.3	320.0	11.6	16.8	0.450	0.373	179.5
1.393	10.7	740.0	3.9	5.4	0.471	0.115	281.8	1.447	9.3	100.0	16.1	23.3	0.450	0.517	66.2
								1.450	22.3	140.0	11.8	17.1	0.449	0.381	79.3
								1.423	37.3	640.0	4.6	6.5	0.459	0.142	255.8
								1.431	42.0	640.0	4.2	6.0	0.456	0.132	251.0
								1.437	6.0	570.0	4.4	6.1	0.473	0.129	222.5
								1.447	21.6	740.0	4.2	6.1	0.450	0.135	291.9
$\gamma = 1.45-1.49 \text{ g/cm}^3$								$\gamma = 1.49-1.53 \text{ g/cm}^3$							
1.455	24.3	130.0	9.4	13.7	0.447	0.306	66.8	1.492	31.1	640.0	4.6	6.9	0.433	0.158	263.0
1.455	28.4	130.0	9.4	13.7	0.447	0.306	66.8	1.493	15.7	115.0	14.8	22.1	0.433	0.511	75.6
1.462	24.5	108.0	9.7	14.2	0.445	0.319	56.5	1.504	28.9	108.0	11.0	16.5	0.429	0.386	61.6
1.462	28.7	152.0	8.7	12.7	0.445	0.286	76.0	1.504	34.8	152.0	8.7	13.1	0.429	0.305	78.1
1.462	26.8	125.0	10.0	14.6	0.445	0.329	66.3	1.500	24.3	140.0	9.5	14.3	0.430	0.331	74.5
1.463	30.3	125.0	10.0	14.6	0.444	0.329	66.3	1.504	30.0	125.0	10.0	15.0	0.429	0.351	68.2
1.475	18.3	165.0	11.9	17.6	0.440	0.399	95.6	1.500	27.3	140.0	9.5	14.3	0.430	0.331	74.5
1.475	16.6	110.0	9.4	13.9	0.440	0.315	57.3	1.505	30.0	125.0	10.0	15.1	0.428	0.351	68.2
1.470	19.0	146.0	8.1	11.9	0.442	0.270	71.4	1.512	28.5	165.0	11.9	18.0	0.426	0.423	98.3
1.475	22.3	123.0	8.3	12.2	0.440	0.278	60.9	1.510	21.8	112.0	9.0	13.6	0.426	0.319	58.6
1.476	28.6	108.0	11.0	16.2	0.439	0.370	60.3	1.510	27.6	210.0	7.1	10.7	0.426	0.251	100.0
1.475	22.4	180.0	7.9	11.7	0.440	0.265	87.4	1.510	28.5	140.0	9.5	14.3	0.426	0.336	75.0
1.475	23.8	141.0	9.8	14.5	0.440	0.329	74.8	1.520	31.5	170.0	9.8	14.9	0.423	0.353	92.9
1.475	28.5	130.0	9.4	13.9	0.440	0.315	67.7	1.530	22.5	140.0	9.6	14.7	0.419	0.351	76.4
1.487	18.8	170.0	9.8	14.6	0.435	0.335	90.9	1.530	29.5	140.0	9.6	14.7	0.419	0.351	76.4
1.485	27.3	128.0	13.6	20.2	0.436	0.463	79.9	1.524	32.7	140.0	11.8	18.0	0.421	0.427	83.9
1.477	9.2	85.0	15.5	22.9	0.439	0.522	56.5	1.520	50.7	740.0	3.9	5.9	0.423	0.140	294.7

BIJLAGE 5 INDELING IN GROEPEN MET ONGEVEER GELIJKE DICHTHEID

$\gamma = 1.53-1.57 \text{ g/cm}^3$								$\gamma = 1.57-1.61 \text{ g/cm}^3$							
γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O	γ g/cm	Iw kgf	h cmH ₂ O	θ gew%	θ vol%	n	S	C' cmH ₂ O
1.533	28.9	110.0	9.7	14.9	0.418	0.356	60.4	1.576	37.6	310.0	5.1	8.0	0.401	0.200	136.5
1.533	23.9	180.0	7.9	12.1	0.418	0.290	90.5	1.576	35.6	123.0	8.3	13.1	0.401	0.326	65.0
1.540	34.5	153.0	12.2	18.8	0.415	0.453	94.4	1.583	31.5	146.0	8.9	14.1	0.399	0.353	79.9
1.544	24.2	117.0	8.7	13.4	0.413	0.325	61.7	1.589	34.6	146.0	8.1	12.9	0.396	0.325	77.0
1.542	31.8	110.0	9.7	15.0	0.414	0.361	60.8	1.583	45.7	570.0	4.4	7.0	0.399	0.175	240.7
1.548	29.0	112.0	9.4	14.6	0.412	0.353	61.3	1.589	47.0	570.0	4.4	7.0	0.396	0.176	241.4
1.540	54.4	640.0	4.2	6.5	0.415	0.156	261.8	1.583	32.3	140.0	9.9	15.7	0.399	0.393	80.5
1.544	32.0	270.0	6.1	9.4	0.413	0.228	124.1	1.580	35.0	100.0	12.0	19.0	0.400	0.474	63.2
1.548	26.6	210.0	7.1	11.0	0.412	0.267	102.2								
1.542	35.5	180.0	7.9	12.2	0.414	0.294	91.1								
1.544	31.3	140.0	9.6	14.8	0.413	0.359	77.1								
1.542	31.4	140.0	9.9	15.3	0.414	0.369	78.1								
1.545	32.8	141.0	9.8	15.1	0.413	0.367	78.5								
1.542	31.8	130.0	9.4	14.5	0.414	0.350	70.8								
1.554	29.7	146.0	8.1	12.6	0.410	0.307	75.2								
1.558	33.5	123.0	8.3	12.9	0.408	0.317	64.2								
1.553	34.9	112.0	9.4	14.6	0.410	0.356	61.5								
1.558	38.7	310.0	5.1	7.9	0.408	0.195	135.2								
1.553	36.8	210.0	7.1	11.0	0.410	0.269	102.5								
1.554	26.8	140.0	9.9	15.4	0.410	0.376	78.8								
1.558	31.5	141.0	9.8	15.3	0.408	0.374	79.2								
1.553	35.0	140.0	9.5	14.8	0.410	0.360	77.3								
1.563	30.5	141.0	9.8	15.3	0.406	0.377	79.5								
1.563	30.0	140.0	9.6	15.0	0.406	0.369	78.2								
1.562	34.1	170.0	10.6	16.6	0.407	0.407	99.5								
1.563	27.2	123.0	8.8	13.8	0.406	0.339	66.1								
1.563	35.8	117.0	9.4	14.7	0.406	0.362	64.7								
1.563	32.4	117.0	9.4	14.7	0.406	0.362	64.7								
1.562	53.3	740.0	3.9	6.1	0.407	0.150	299.6								
1.563	38.3	310.0	5.1	8.0	0.406	0.196	135.6								
1.563	29.1	270.0	6.1	9.5	0.406	0.235	125.4								
1.563	37.0	270.0	6.1	9.5	0.406	0.235	125.4								
1.562	33.0	140.0	11.8	18.4	0.407	0.453	86.4								
1.540	32.5	128.0	13.6	20.9	0.415	0.505	83.6								
1.554	25.7	570.0	4.4	6.8	0.410	0.167	237.6								